内 容 提 要

本书分为斜拉桥、悬索桥、拱桥和梁桥等四篇。从桥式的发展概述入手，介绍了桥梁的各部分结构构造，论述了四类桥梁主要结构的施工方案、施工技术和工艺方法。

本书可供桥梁工程专业技术人员学习参考，同时也可作为高等院校相关专业师生学习参考用书。

书　　名：大跨度桥梁施工技术
著 作 者：王武勤
责任编辑：吴有铭　袁　方
出版发行：人民交通出版社
地　　址：(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号
网　　址：http://www.ccpress.com.cn
销售电话：(010)85285838,85285995
总 经 销：北京中交盛世书刊有限公司
经　　销：各地新华书店
印　　刷：
开　　本：787×1092　1/16
印　　张：
字　　数：　千
版　　次：2007 年 1 月　第 1 版
印　　次：2007 年 1 月　第 1 次印刷
书　　号：ISBN 7-114-06229-X
印　　数：0001—3000 册
定　　价：40.00 元
(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

序言

XUYAN

国家改革开放的大好形势促进了交通事业的大发展，全球最大规模的交通基础设施建设极大地提高了路网的服务水平。

桥梁是架起来的路，飞越深沟峡谷、横跨江河湖海，使天堑变通途。我国现有桥梁总数的50%和桥梁总长度的66%是在过去15年里建造起来的。这一个时期建设的桥梁工程的特点是：桥梁类型多、跨径突破大、技术进步快。

在公路桥梁方面，上海卢浦大桥、重庆巫山长江大桥、万县长江大桥和山西丹河石拱桥等分别位于同类拱桥跨径的世界首位；重庆石板坡大桥跨径居梁式桥梁的世界第一；南京长江三桥和二桥分别居于世界斜拉桥跨径的第3和第4位；润扬长江大桥和江阴长江大桥分别居于世界悬索桥跨径的第3和第5位。在风大浪急、气候恶劣的海象条件下，成功地修建了32.5km长的东海大桥。此外，还有几座世界级的桥梁正在建设中，其中苏通长江大桥建成后将成为世界最大跨度的斜拉桥、舟山西堠门大桥将成为世界第二大跨度的悬索桥、重庆朝天门长江大桥将成为世界最大跨径的钢桁肋拱桥等。

在铁路桥梁方面，在武汉、南京、九江长江大桥基础上，芜湖长江大桥成为国内公、铁两用跨度最大的桥梁；在建的武汉天兴洲长江大桥和南京高速铁路长江大桥将成为世界上跨度最大、荷载最重的铁路桥梁。

应该说，我国桥梁建造技术达到了世界先进水平，进入了世界桥梁强国之列。

时代在前进，素质要提高，技术要创新。总结我国桥梁工程建设积累起来的成功技术和宝贵经验，探索桥梁建造技术创新的方向，无疑是非常必要的。本书分四种桥型，比较全面地介绍了大跨度桥梁的施工技术、工艺和工程实例，总结了我国现阶段的先进施工经验，具有一定的现实意义和工程价值，可供桥梁专业技术人员参考借鉴。

值此国庆、中秋双节来临之际，欣闻其书稿即将付印，特作序，以为鼓励。

交通部总工程师 凤懋润

2006年9月28日于北京

前言

QIANYAN

中国桥梁历史悠久，精湛的桥梁建造技术和艺术在古代就已闻名于世，它是中华民族绚丽多姿的文化瑰宝不可分割的重要组成部分。近二十多年来，随着综合国力的显著提高和交通事业的飞速发展，我国桥梁建设者获得了充分展示聪明才智的难得机遇，在神州大地上陆续新建了成千上万座桥梁，跨越江河湖泊、深沟峡谷、海峡岛屿。特别是在大跨度悬索桥、斜拉桥、拱桥和梁桥等方面，多座桥梁已跃居世界桥梁跨度前列，有的已居领先地位。可以毫不夸张地说，我国目前已堪称世界桥梁大国。

本书得益于目前桥梁施工的众多实例和丰富工程经验，力求总结提炼国内外近年来在大跨度桥梁施工方面的先进技术和工艺，继承和保留传统的实用技术和工艺，希望能对读者有所裨益。

全书分为斜拉桥、悬索桥、拱桥和梁桥等四篇。各篇先从桥式的发展概述入手，接着介绍桥梁的各部分结构构造，然后分桥梁的主要部位分别介绍主要的施工方案、施工技术和工艺，以及注意要点。为了能使读者更好地理解和参阅，对主要部位的施工都列举了实例，并对有些比较容易出现的质量和安全事故，也结合作者的经验和体会予以列举和强调。对一些关键部位的施工设计计算原理和方法，以及一些常用的主要机具设备也给予了介绍。总之，对涉及大跨度桥梁施工技术的主要方面都力求述及，但限于篇幅，本书未包含桥梁的基础施工技术部分。

本书作者根据自己多年的亲身工程实践经历，以及近年来受聘参加国内有关大跨度桥梁咨询和审查专家组所收集和了解的大跨度桥梁施工技术资料，并参考许多专家和学者的专业论文著作，利用业余时间历时近五年编著完成书稿。在此，特对有关的论著作者和桥梁建设工程师们表示崇高的敬意和衷心的感谢。中国交通建设集团有限公司的领导和同仁以及人民交通出版社的领导和编辑为本书的出版给予了很大的关心和支持，在此一并表示诚挚的谢意。

当前，我国的桥梁建设事业方兴未艾，正逐渐向桥梁强国的方向快速迈进，但愿本书的出版能为我国大跨度桥梁施工技术的发展尽一点绵薄之力。

由于作者施工经历和技术水平有限，书中可能存在疏漏和错误，恳请读者批评指正。

来函请寄：北京市安定门外大街乙88号　中国交通建设集团有限公司　王武勤（邮编：100011，电话：010－64287236）。

编著者

2006年9月于北京

目录 MULU

第一篇　大跨度斜拉桥施工

第一章　斜拉桥概述…… 3
　第一节　斜拉桥的发展…… 3
　第二节　斜拉桥的结构构造…… 4
第二章　索塔施工…… 9
　第一节　斜拉桥索塔的基本类型…… 9
　第二节　混凝土索塔的施工 …… 10
　第三节　钢索塔的施工 …… 18
第三章　主梁施工 …… 28
　第一节　斜拉桥主梁概述 …… 28
　第二节　斜拉桥混凝土主梁的悬臂浇筑施工 …… 29
　第三节　斜拉桥混凝土主梁的悬臂拼装施工 …… 44
　第四节　斜拉桥钢主梁悬臂拼装施工 …… 47
第四章　斜拉索的安装 …… 58
　第一节　斜拉索概述 …… 58
　第二节　斜拉索的安装 …… 61
　第三节　斜拉索的调索与索力量测 …… 75
　第四节　斜拉索的更换及调索 …… 85
　参考文献 …… 88

第二篇　大跨度悬索桥施工

第一章　悬索桥概述 …… 91
　第一节　悬索桥的发展简况 …… 91
　第二节　悬索桥的主要结构构造 …… 95
　第三节　大跨度悬索桥施工的主要机械设备…… 100
第二章　悬索桥主塔和索鞍施工…… 106
　第一节　钢桥塔和混凝土桥塔的安装…… 106
　第二节　悬索桥索鞍吊装施工…… 110
第三章　猫道和主缆架设施工…… 113

第一节　主缆架设的准备工作…… 113
第二节　主缆架设…… 122
第四章　加劲梁施工…… 135
第一节　钢桁梁加劲梁的架设…… 135
第二节　钢箱梁加劲梁的架设…… 136
参考文献…… 144

第三篇　大跨度拱桥施工

第一章　拱桥概述…… 147
第一节　拱桥的主要种类…… 147
第二节　大跨度拱桥的施工用缆索吊装设备…… 150
第二章　钢管混凝土拱桥…… 156
第一节　概述…… 156
第二节　钢管混凝土拱桥的结构形式和基本性能及特点…… 156
第三节　钢管拱肋的制作 …… 161
第四节　钢管混凝土拱桥的架设…… 162
第三章　劲性骨架混凝土拱桥的无支架吊装施工…… 190
第一节　劲性骨架混凝土拱桥简介…… 190
第二节　劲性骨架混凝土拱桥的施工实例…… 191
第四章　钢箱拱桥施工…… 198
第一节　概述…… 198
第二节　施工技术及工艺…… 200
参考文献…… 206

第四篇　大跨度梁桥施工

第一章　大跨度梁桥概述…… 209
第一节　大跨度预应力混凝土连续梁概述…… 209
第二节　大跨度梁桥的结构构造…… 212
第二章　大跨度预应力混凝土梁桥的悬臂灌注施工…… 222
第一节　移动式挂篮悬臂灌注施工…… 222
第二节　连续梁移动式桁梁悬吊模架法现浇施工与设计…… 239
第三节　分段悬臂现浇施工的其他方法…… 243
第四节　钢-混组合连续刚构桥施工 …… 248
第五节　混凝土梁桥主要安全隐患和质量通病…… 253
第六节　悬臂现浇挂篮设计及施工实例…… 254
第三章　大跨度预应力混凝土梁预制悬臂拼装施工…… 262
第一节　预制悬臂拼装与悬臂浇筑的比较…… 262
第二节　悬臂拼装施工梁段的预制…… 263
第三节　梁段的运输和悬臂拼装的施工方法…… 268
第四节　预制拼装施工实例…… 274

第五节　悬臂拼装接缝的处理…… 276
第六节　悬拼预应力及悬拼质量的控制…… 279
第四章　大跨度钢桁架桥施工…… 282
第一节　钢桥概述…… 282
第二节　钢桁架桥的杆件制造…… 288
第三节　钢桁架桥的悬臂拼装施工…… 290
第四节　拖拉法架设钢梁…… 306
参考文献…… 320

第一章 斜拉桥概述

DIYIZHANG

第一节 斜拉桥的发展

斜拉桥是一种桥面体系主要受压、索体系受拉的桥式。

瑞典1955年建成的主跨183m的Strömsund桥，标志着世界现代斜拉桥修建的开始。

进入20世纪90年代以后，斜拉桥的设计施工技术发展迅速、结构形式也不断创新，已建成的钢主梁斜拉桥跨度已接近千米，在建的斜拉桥跨度已超过千米，表1-1-1是世界目前跨度前10位已建斜拉桥的情况。

世界已建成的前十位斜拉桥　　表1-1-1

编号	国家	桥名	跨径布置(m)	主梁	塔型/塔高(m)	完成年份
1	日本	多多罗桥	270+890+320	钢箱梁	倒Y形钢/220	1999
2	法国	诺曼底桥	547.8+856+737.7	钢箱梁	倒Y形混凝土/202.7	1995
3	中国	南京长江三桥	63+255+648+255+63	钢箱梁	人字形钢/215	2005
4	中国	南京长江二桥	58.5+246.5+628+246.5+58.5	钢箱梁	倒Y形混凝土/195.4	2001
5	中国	武汉白沙洲桥	50+180+618+180+50	钢箱梁	A形混凝土/175	2000
6	中国	福建闽江大桥	90+200+605+200+90	结合梁	A形混凝土/175	2001
7	中国	上海杨浦大桥	99+144+602+144+99	结合梁	钻石形混凝土/200	1993
8	中国	上海徐浦大桥	242+590+242	结合梁	A形混凝土/210	1996
9	中国	舟山桃夭门大桥	48+3×39+45+590+45+45+3×39+48	混合梁	A形混凝土/151	2003
10	中国	汕头岩石大桥	47+47+100+518+100+47+47	混合梁	A形混凝土/168	1998

综观斜拉桥的发展历史，基本上分为两个阶段：

(1)20世纪80年代以前，由于结构分析方法和钢材性能的限制，以及钢拉索防腐技术工艺的不成熟，跨度突破不大，最大跨度是法国修建的Saint-Nazaire桥，跨径组成为158+404+158(m)，主梁采用正交异性箱梁桥面，A形索塔，拉索为放射形。

(2)20世纪90年代以后，随着结构分析方法的成熟和完善，以及高强度钢材的应用和拉索防腐技术工艺的提高，斜拉桥的跨度产生了质的飞跃，最有代表性的已建斜拉桥是日本的多

多罗桥和法国的诺曼底桥，孔跨布置分别是 270＋890＋320(m)和 547.8＋856＋737.7(m)，至今位居世界已建成斜拉桥跨度的第一和第二。

第二节　斜拉桥的结构构造

一、主　　梁

与其他梁式相同，斜拉桥的主梁也是直接承受车辆荷载的结构，其受力性能与塔的刚度、塔墩梁的连接方式、索的刚度、索形布置等都有关。

主梁的梁高与主跨比一般在 1/50～1/100，当采用密索体系时，其高跨比可在 1/200 以下。

主梁可采用钢梁、混凝土梁和结合梁，对于大跨度斜拉桥，一般采用钢梁或结合梁。主梁的截面形式有箱形、结合梁、边主梁等。

1. 钢箱梁

钢箱梁一般采用正交异性板，其典型截面分别如图 1-1-1 所示。

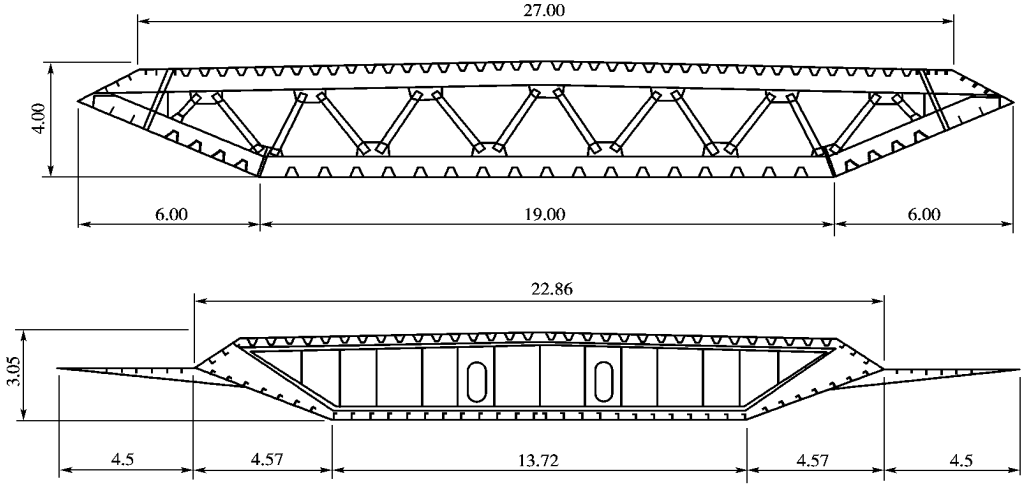


图 1-1-1　典型钢箱梁桥(尺寸单位：m)

2. 混凝土箱梁

混凝土箱梁作为斜拉桥的主梁，一般采用预应力结构，常为双向预应力结构，即纵向预应力和横向预应力。

图 1-1-2 为山东滨洲黄河斜拉桥的混凝土主梁截面。该桥是新建的 205 国道高速公路跨越黄河的重要桥梁。主桥是三塔预应力混凝土斜拉桥，跨度为 42＋42＋300＋300＋42＋42(m)。设计时速 120km/h，主桥范围内全桥宽 38.2m，其中桥面净宽 2×11.75m，中央分隔带宽 3m，两侧护栏 2×0.5m，其余为拉束锚固区。设计荷载标准为：汽车-超 20 级，挂车-120。主梁及护栏底座采用 C55 混凝土；预应力钢绞线的标准强度为 1860MPa，弹性模量为 1.95×10^5MPa，符合 ASTM A416－92 的规定，普通钢筋采用 II 级钢筋。斜拉索采用直径 7mm 的镀锌高强度低松弛钢丝，拉索锚固点在边箱的边缘处。

主梁采用预应力混凝土箱梁。标准节段箱梁断面形式为半封闭式三角形断面，梁高 3m，

边箱斜腹板厚 25cm，边跨直腹板厚 100cm，中跨直腹板厚 35cm。中跨主梁桥面板厚 30cm，边跨桥面板厚 40cm。横隔梁与斜拉索对应布置，即边跨间距 6m，中跨间距 7.5m，在边塔和中塔处适当加密。主梁在中塔处与中塔固结，边塔处半漂浮。主梁施工方法采取落地支架现浇与前支点挂篮悬臂浇筑结合，其中边跨现浇、中跨悬浇。

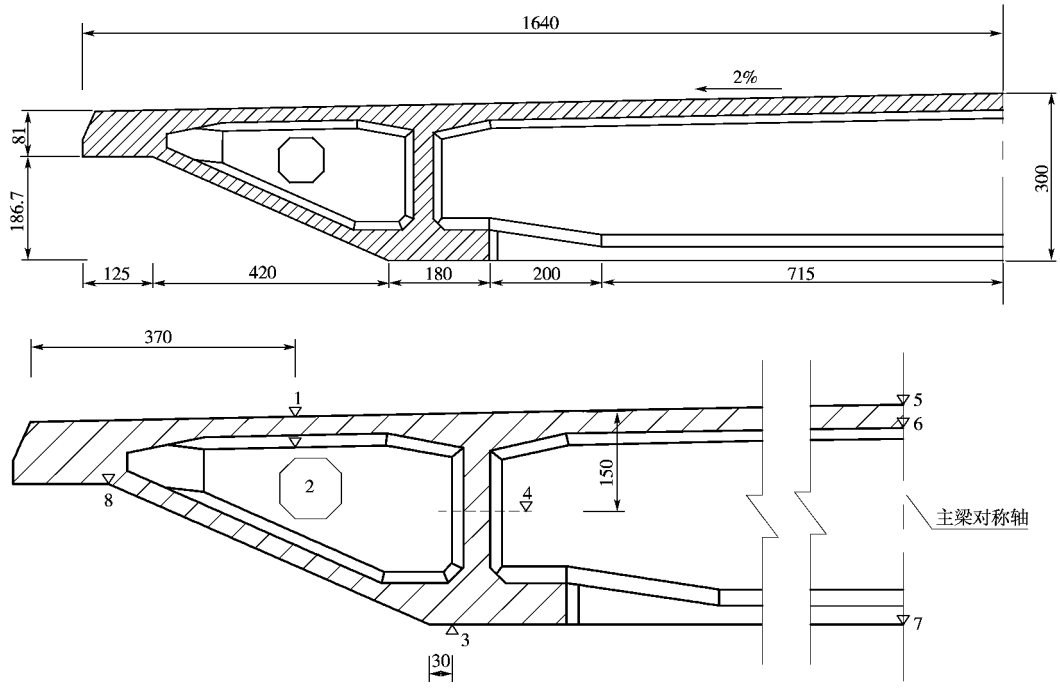


图 1-1-2　山东滨州黄河斜拉桥的混凝土主梁截面（尺寸单位：cm）

3. 结合梁

结合梁是相当于用预制混凝土桥面板代替钢箱梁的正交异性钢桥面板而形成的钢混结构，其相对于钢箱梁而言，节省钢材，同时刚度和抗风稳定性也优于钢梁。除此之外，由于桥面板采用混凝土，从而使桥面铺装层的设计和施工变得比较容易，而且不容易产生结合部位破坏，增强了耐久性。

我国的南浦和杨浦大桥均采用结合梁主梁。杨浦大桥的主梁截面如图 1-1-3 所示。

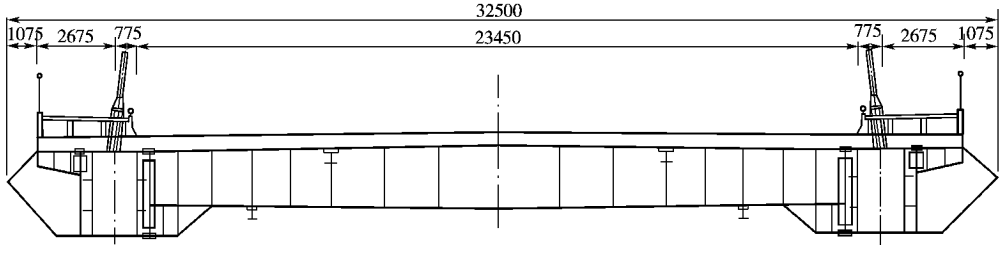


图 1-1-3　杨浦大桥典型断面（尺寸单位：mm）

杨浦大桥是一座双塔双索面漂浮体系斜拉桥，孔跨布置为：40＋99＋144＋602＋144＋99＋44（m），桥面宽度为 30.35 m，两箱型主梁的中心距为 25 m，标准索距为 9 m，工字形钢横梁间距为 4.5m，桥面主梁由钢主梁、横梁、小纵梁、小挑梁与混凝土桥面板等组成，钢和混凝土桥面板之间用抗剪焊钉联结在一起。

4. 混合梁

为了减少主跨内力和变形、减小或避免边跨端支座出现负反力，现代大跨度斜拉桥往往采用主跨大部分或全部分为钢梁，边跨采用混凝土梁的方案。这种布置除了可以节省钢材外，也特别适用于边跨与主跨比值较小的情况。

由于混合梁结合部位结构的突变，往往是混合梁最容易出问题的地方，为了减小过渡段受力的不利情况，一般应将结合部位选在弯矩和剪力都比较小的地方，另外，要从构造措施上保证传力，如：两种不同性质的梁的重心尽可能地重合；在重叠部分的钢梁上焊接抗剪钉或设置抗剪器；在结合部位设置预应力等。

混合梁斜拉桥的典型实例有：法国诺曼底桥、日本多多罗桥、武汉白沙洲长江大桥、汕头岩石桥等。

二、拉　　索

拉索承受桥面传来的恒载活载以及风载等，并将其传递到主塔上，它是斜拉桥的主要受力构件。

1. 拉索的纵向布置

拉索的纵向布置有辐射形、竖琴形、扇形和星形，如图 1-1-4 所示。

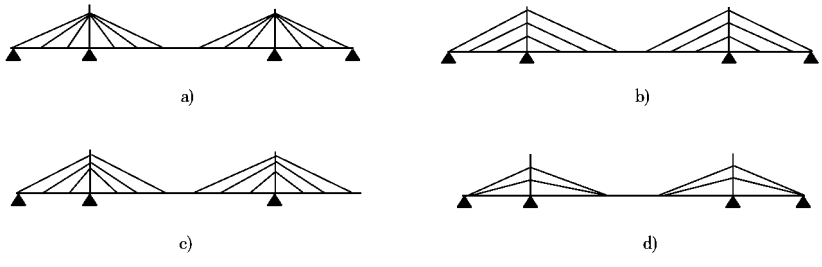


图 1-1-4　斜拉索立面布置

a)辐射形；b)竖琴形；c)扇形；d)星形

(1)辐射形索

辐射形索的所有索上端均锚固于塔顶，所以相对于其他布索方式而言，大部分索与主梁的夹角较大，因而对梁产生的水平分力较小，而且长索所产生的柔性对结构抗震也有利。但由于对于大跨度桥而言，过多的索集中锚固在塔顶是比较困难的，有时甚至是不可能的。所以，在适宜的中等或中等偏大的斜拉桥上比较适用。

辐射形布索因在一定的视角内拉索有交叉现象，虽然没有竖琴形布索美观，但对于大跨度斜拉桥而言，其对美观的影响不大。

(2)竖琴形(平行)索

竖琴形布索的特点是给人以均匀、顺畅、清晰的视觉美感，但从经济和技术的角度，它并不是最佳的选择。

(3)扇形索

扇形索介于平行索和辐射形索之间，综合了平行索和辐射形索的一些特点，虽然在视觉效果上比平行索差，但比辐射形索在塔上的锚固则容易处理，而且拉索对主梁的支承效能变化不大，是大跨度斜拉桥比较理想的一种索布置形式。

(4)星形索

斜拉索在塔上的锚固是分开的，而在主梁上则集中在一个公共点上。显然，这种布索方式不太适宜大跨度斜拉桥。

2. 拉索的横向布置

拉索的横向布置形式主要有中心布索（单索面）、侧布索（双索面）和三索面三种体系，如图 1-1-5 所示。

（1）中心布索体系

单索面斜拉桥只能是中心布索。其具有整体视觉效果最佳，较大的桥面抗扭刚度可以有效地减小二次矩，同时增强结构的整体动力稳定和空气稳定性的优点。但由于这种结构的拉索破坏荷载较低，应限定拉索的应力变化。此外，桥面宽度过大时，这种结构会带来很大的扭矩，因而不宜采用。

（2）侧布索体系

对于较大桥面宽度的斜拉桥，基本上都采用侧布索体系。当索塔横向采用双柱形、门形结构时，索面为竖直布置，当采用倒 Y 形、A 形及菱形索塔时，一般采用斜索面布置，斜索面布置类似于空间刚架，能大大减小桥面结构的转动，而且空气动力性能好，但会带来桥面的净空问题，此外，侧布索会引起索塔产生弯矩，应在设计中考虑。

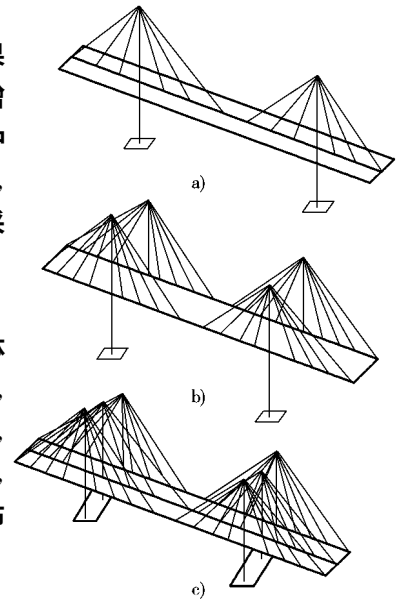


图 1-1-5　斜拉索横桥向布置
a）单索面；b）双索面；c）三索面

（3）三索面体系

三索面体系能避免由于桥面过宽而产生的较大的横向弯矩。以往由于力学和美学的双重原因，迄今为止尚无建成的实例。在建的只有我国武汉天兴洲公铁两用长江大桥的南汊主跨斜拉桥，如图 1-1-6 所示。

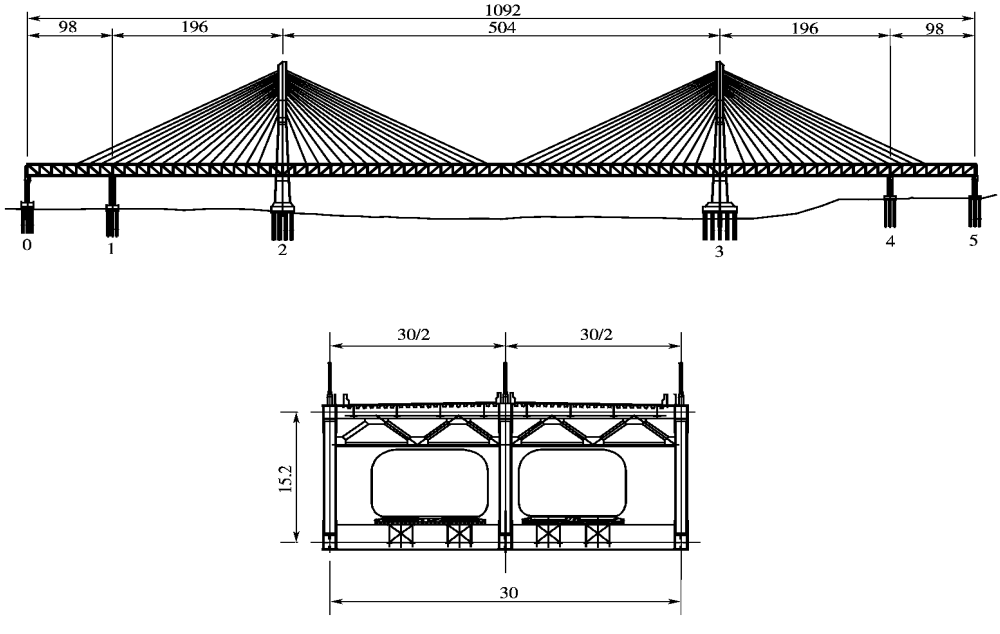


图 1-1-6　武汉天兴洲公铁两用长江大桥南汊主跨斜拉桥（尺寸单位：m）

武汉天兴洲公铁两用长江大桥正桥全长4657.1m。在天兴洲南汊公路、铁路合建。

①主桥梁立面布置。主桥为98＋196＋504＋196＋98(m)钢桁斜拉桥，上层为公路桥面，下层为铁路桥面。

②横断面布置。如图1-1-7所示，铁路四线，其中下游侧两线为Ⅰ级干线，上游侧两线为客运专线；公路六车道，全宽27m。

③斜拉索体系。设计中比较了平行钢丝索及钢绞线索两种方案，两种方案均有成熟的技术和成功应用实例，按平行钢丝索体系设计。

④为适应速度目标，铁路桥面采用纵横梁体系、道碴桥面。为减轻恒载并为减小辅助墩负反力，同意公路桥面系在主桁全联两端各126m采用混凝土结合板，中部840m采用正交异性板的方案。

⑤主梁为钢桁梁，N形桁架，三片主桁，桁宽30m，桁高15.2m，节间长度14m。主桁弦杆均采用箱形截面，部分斜杆采用箱形截面，其余斜杆、竖杆采用H形截面。主桁节点采用焊接整体节点，节点外拼接。斜拉索锚固于主桁上弦节点。钢梁采用Q370q-E钢。

⑥如图1-1-8所示，主塔采用钢筋混凝土结构，倒Y形，承台以上高度为188.5m；每塔两侧各有3×16根斜拉索；斜拉索为镀锌平行钢丝，最长索271m，最大索力约12500kN。公路桥面处索距14m，三索面间相邻索面中心距15m。

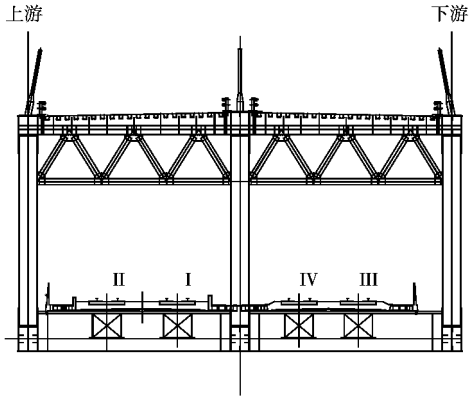


图1-1-7　合建段主桥铁路桥面布置示意图

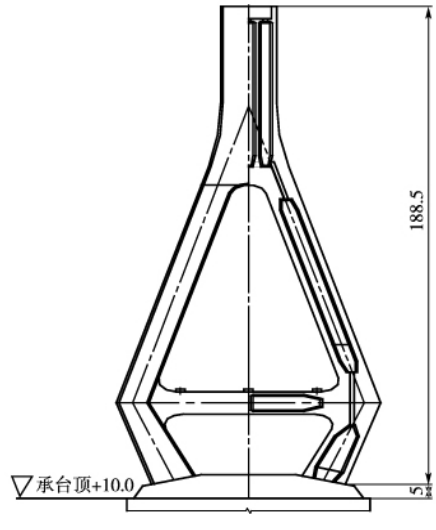


图1-1-8　南汊主跨斜拉桥钢筋混凝土主塔
(尺寸单位：m；高程单位：m)

⑦结构体系。边墩、辅助墩以及主塔墩上均设有竖向支座和约束梁体横向位移的支座或构造，主塔与钢桁梁之间设约束梁体纵向位移的液压阻尼装置。

第二章 索塔施工

DIERZHANG

第一节 斜拉桥索塔的基本类型

斜拉桥的主塔承受的荷载主要有：塔身自重力、拉索传递的水平及竖直分力、风力、地震力等。这些力在塔身上产生的综合效应为沿桥塔纵横向的水平剪力和弯矩，以及轴向压力等。

一、桥塔的纵向布置

一般斜拉桥的顺桥向布置形式基本为单柱式、倒Y形、A字形等，如图1-2-1所示。

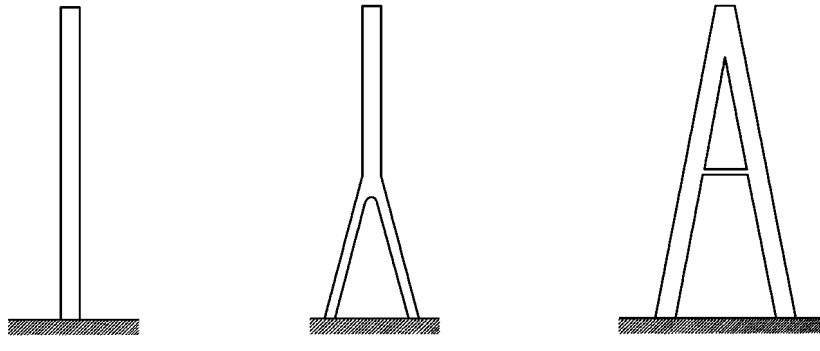


图1-2-1 塔柱形式（顺桥向）

a）单柱式；b）倒Y形；c）A字形

单柱式索塔沿桥纵向的刚度一般较小，抵抗纵向弯矩的能力相对较低，而A字形和倒Y形索塔沿桥纵向的刚度较大，抵抗弯矩的能力较大。采用何种索塔，应根据跨度、拉索的形式等综合考虑。

二、桥塔的横向布置

索塔沿桥横向的布置主要有：柱式、门式、A形、倒Y形、菱形（宝石形）等。如图1-2-2所示。

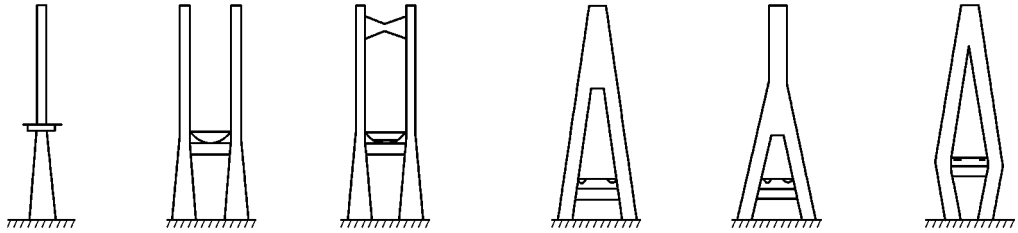


图 1-2-2　索塔横向基本结构形式

a)柱式；b)、c)门式；d)A 形；e)倒 Y 形；f)菱形(宝石形)

柱式塔是最简单的一种形式，其刚度较小，一般适用于单索面的斜拉桥，相应地，主梁的刚度就要大些。门式塔横向刚度较大，可以作为桥面宽度不大双索面斜拉桥的索塔。A 形和倒 Y 形以及菱形索塔的横向刚度较大，适用于大跨径的斜拉桥。

索塔的高度主要由下列因素确定：

(1)拉索的倾角。若索塔的高度较小，拉索的倾角随之较小，拉索的水平分力对主梁的压力较大，但竖直分力对主梁的支承作用则较小，就要求增加拉索的数量。

(2)主塔的工程量和施工难度。若主塔的高度过大，除了增加工程量外，施工难度亦相应增大。

综合各种因素，经过计算分析和工程实践证明，双塔斜拉桥与主跨的比一般在 0.18～0.25 之间，独塔斜拉桥的塔高与主跨的比应在 0.30～0.45 之间。

除此之外，斜拉桥主塔的横向布置应能满足桥面行车的净空要求。

三、索塔的美学考虑

除了满足功能性要求外，斜拉桥的索塔还要考虑与环境协调的美学要求。具体应根据桥位处的地形地貌、城市建筑、人文环境等综合决定。

第二节　混凝土索塔的施工

一、混凝土索塔施工的基本方法

斜拉桥混凝土索塔的施工方法主要有滑模法、翻模法、爬模法等，其施工机具设备和工艺与悬索桥主塔的施工基本相同。施工主要机具设备有：塔吊、电梯、钢支架、滑升模板系统、翻升模板系统、爬升模板系统等。本节仅以山东滨洲黄河斜拉桥的桥塔施工为例，介绍爬模施工的基本技术和工艺。其余几种施工方法详见“第二篇大跨度悬索桥 第二章 悬索桥主塔施工 第二节　混凝土桥塔的安装”。

二、爬　模　法

爬模的特点是系统自身备有提升设施或动力的模板系统。根据动力不同，可分为人工倒链爬模、电动爬架翻模、液压爬升模等，其中使用较多的是液压爬升模。液压爬升模主要由模板、爬架和提升系统组成。

模板一般采用钢制大模板，也有采用胶合木模板的。沿竖向一般布置3～4节，每节高度根据模板支架的构造、提升能力等因素采用2～5m，图1-2-3为山东滨洲黄河斜拉桥的桥塔爬模基本布置。

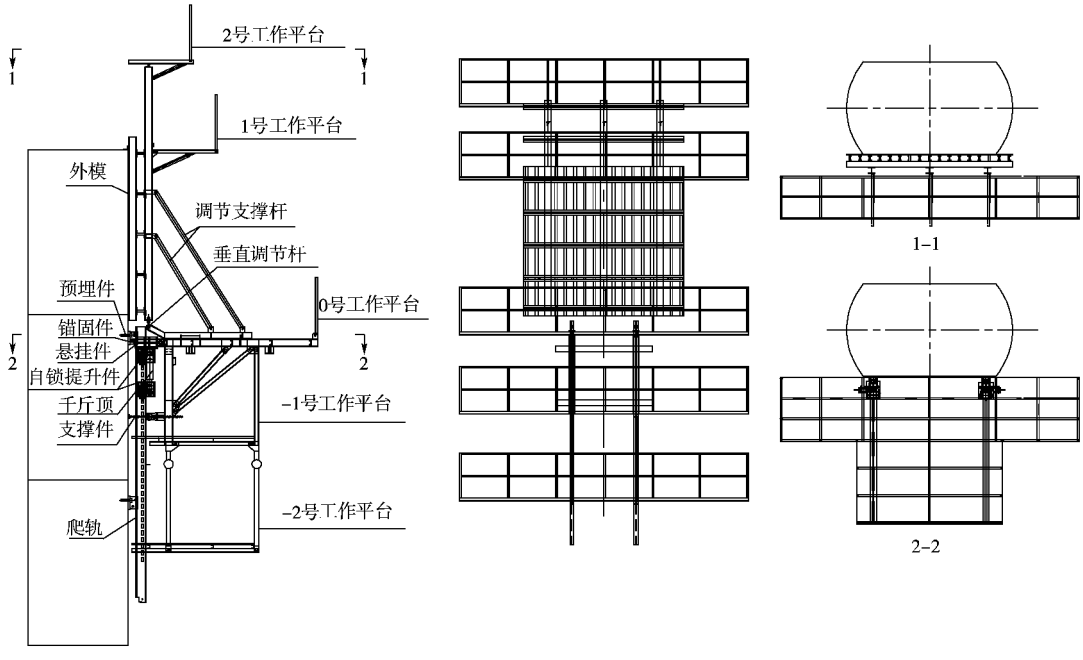


图1-2-3　山东滨洲黄河斜拉桥的桥塔爬模基本布置

1. 爬架系统

爬架的基本构架一般用特制型钢杆件和组拼式杆件组成，在其中设置导向滑轮提升结构，以使爬架结构可沿导轨顺利上滑。爬架的下部一般为附墙固定架和下部操作平台，上部一般为上操作平台。根据塔柱的结构和模板的高度以及动力选用等因素，爬架的高度一般在15～20m。

2. 提升系统

提升系统一般分为爬架自提升系统和模板提升系统，目前大跨度悬索桥的高索塔一般采用电动液压千斤顶作为动力，而模板提升一般采用电动卷扬机。为了保证爬架和模板系统安全顺畅地提升，提升系统应对称、均匀、缓缓地提升。

3. 爬模安装

爬模的安装如图1-2-4a)、b)、c)所示。爬模标准节段的施工工艺流程如图1-2-5所示。

爬模的爬升如图1-2-6所示。

塔柱采用爬模施工的工艺流程如图1-2-7所示。

三、混凝土索塔拉索锚固区的施工

斜拉桥索塔除了和悬索桥主塔施工大致相同外，由于大量拉索要锚固在索塔上，所以，索塔的结构构造有其特殊之处，应根据不同的锚固形式选用不同的施工方法。

常见拉索的锚固形式主要有：交叉锚固（图1-2-8）、钢梁锚固（图1-2-9）、预应力箱形锚固（图1-2-10）。

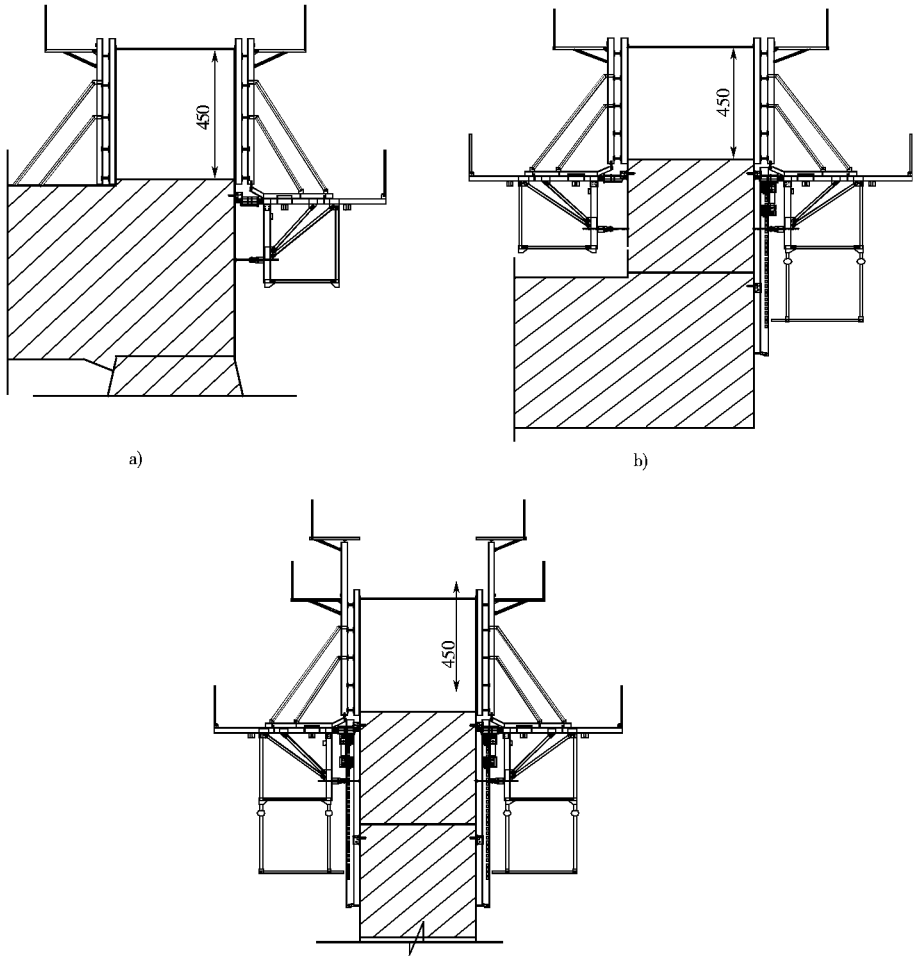


图 1-2-4　**爬模安装示意图(尺寸单位**:cm)

a)**爬模第一节段安装示意**;b)**爬模第二节段安装示意**;c)**爬模第三节段安装示意**

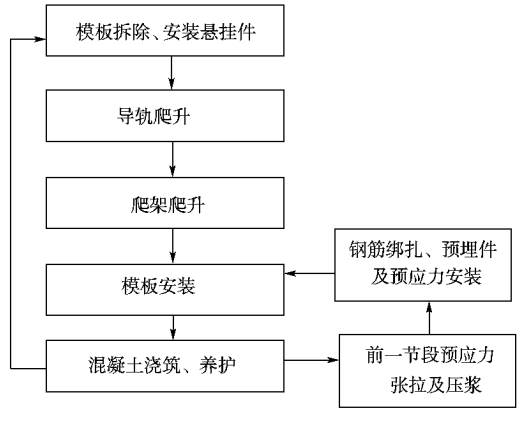


图 1-2-5　**爬模标准节段的施工工艺流程图**

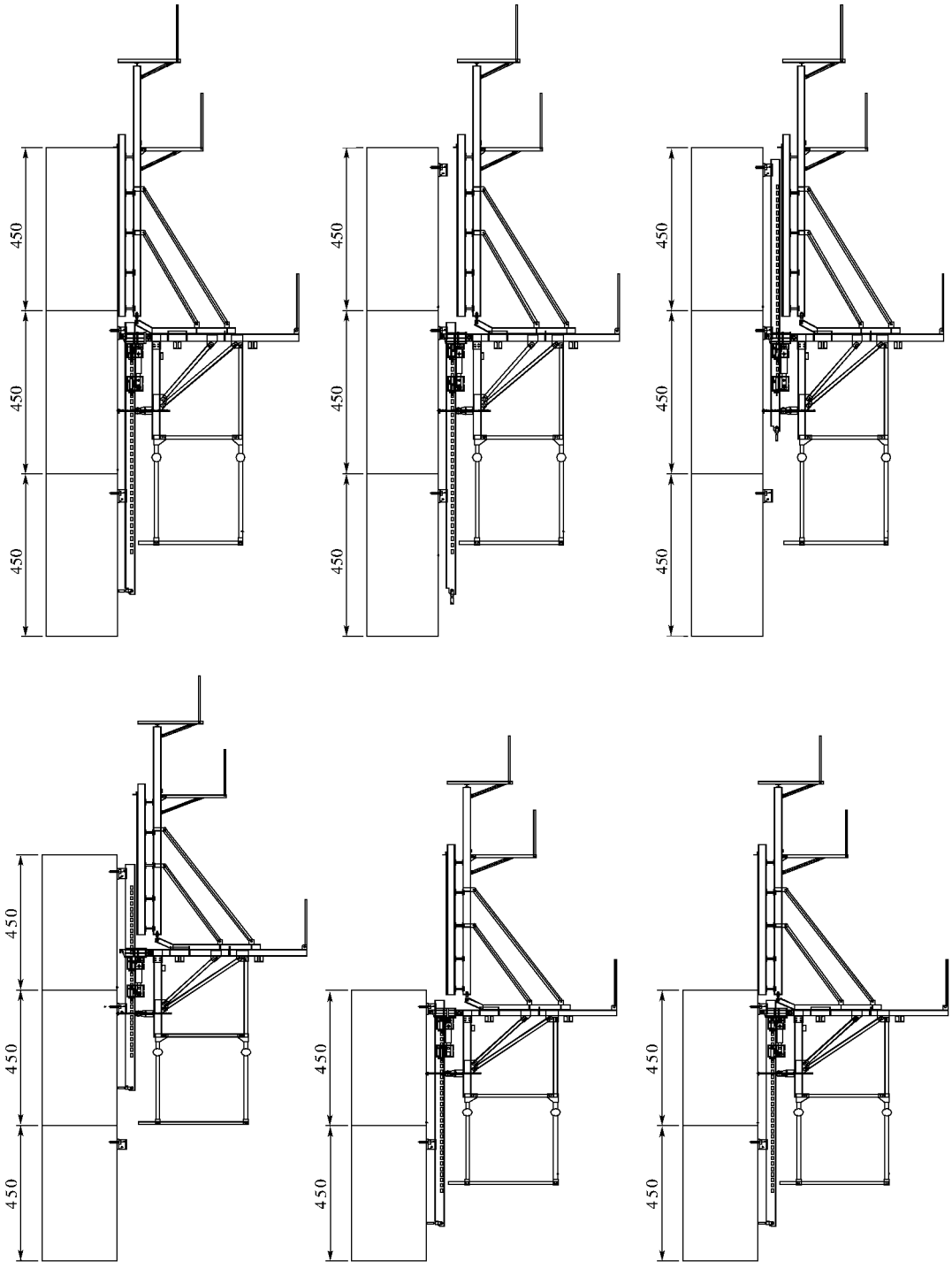


图 1-2-6　**爬模的爬升示意图(尺寸单位**:cm)

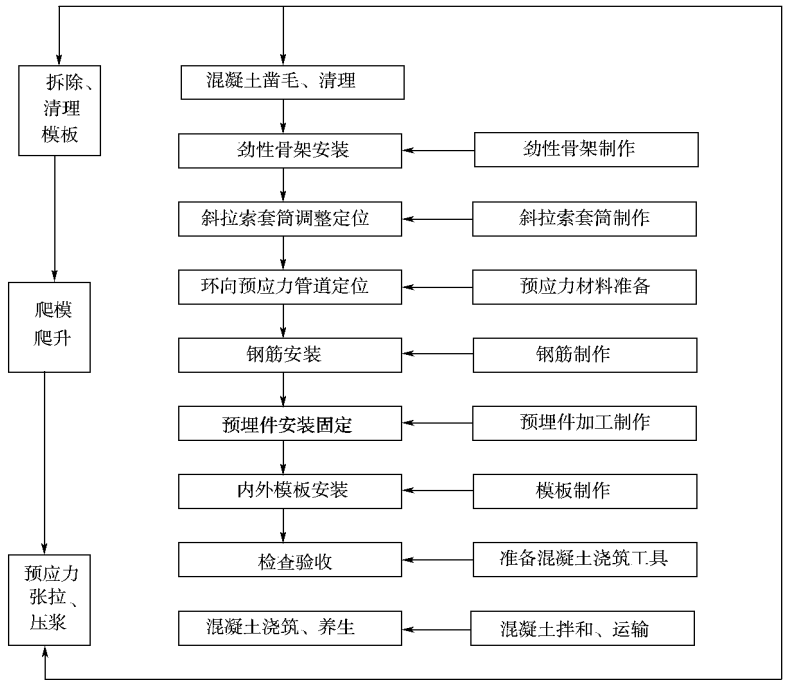


图 1-2-7　**爬模施工的工艺流程图**

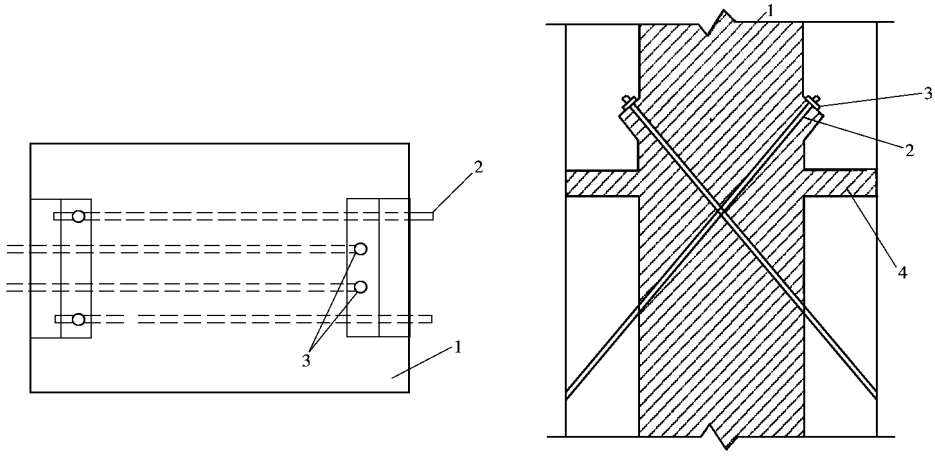


图 1-2-8　**交叉锚固型**

1-**塔柱**；2-**拉索**；3-**锚具**；4-**横隔板**

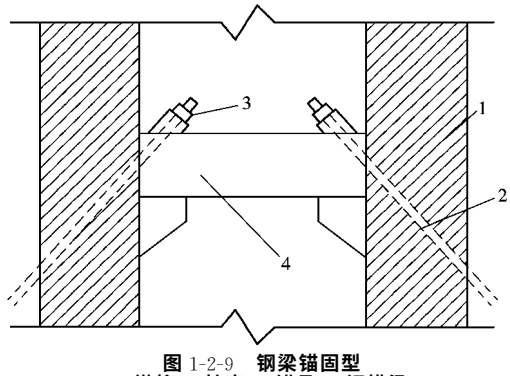


图 1-2-9　**钢梁锚固型**

1-**塔柱**；2-**拉索**；3-**锚具**；4-**钢横梁**

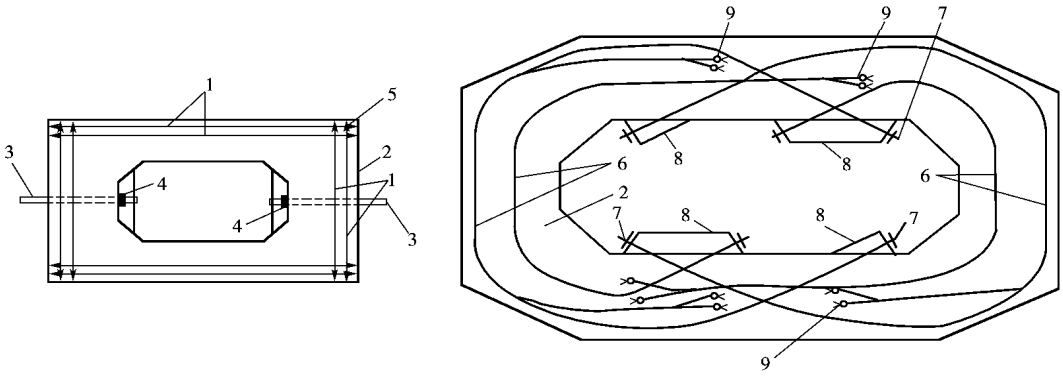


图 1-2-10　预应力箱形锚固型

a)塔身直线预应力筋平面示意图;b)塔身环向预应力筋平面示意图

1-直线预应力筋;2-塔体;3-拉索;4-拉索锚具;5-直线预应力筋锚具;6-塔身环向预应力筋;7-螺母锚固端;8-锚头混凝土;9-埋置锚固端

由于大跨度斜拉桥拉索的锚固一般采用后两种方法,故介绍之。

1. 钢梁锚固法的施工

(1)施工程序

安装劲性骨架→绑扎钢筋→安装钢筋连接套筒→套筒定位→安装外侧模板→混凝土浇筑→安装横梁。

(2)安装钢横梁

由于拉索锚固空间位置要求很高,所以,钢横梁必须在工厂按照桥梁钢结构的制作要求加工,运至工地安装。

对于大跨度斜拉桥,由于钢横梁尺寸比较大,质量较大,在设计时应结合工地可能的起吊能力,或设计为整体,或设计成分块起吊、高强度螺栓连接的方法施工。

2. 预应力箱型锚固法的施工

(1)施工程序

安装劲性骨架→绑扎钢筋→安装钢筋连接套筒→套筒定位→安装预应力管道及钢束→安装模板→混凝土浇筑及养生→施加预应力→压浆。

(2)预应力施工

①预应力管道安装。在安装预应力管道时,要精确测定管道的空间位置并定位,管道必需牢固地固定,保证管道不漏浆、不变形、在曲线处平顺过渡。严禁电焊、气割等作业损伤预应力管道和钢筋。

②预应力钢筋张拉。除了由于张拉空间狭小,需选用较为轻便的油泵和千斤顶外,其张拉与普通预应力张拉没有大的区别,张拉后必须及时注浆。为了保证灌浆密实,宜采用真空压浆法。

对于大跨度的斜拉桥,为了使锚箱吊装施工斜拉索定位更准确,往往采取在锚固段设置钢锚箱构架的方案。钢锚箱采取分节预制,利用塔吊吊装,节间用高强螺栓紧固连接。如图

图 1-2-11　斜拉桥钢锚箱吊装

1-2-11所示。对于制造和安装引起的误差，采用不同厚度的钢垫板在连接处进行调整。

四、斜拉桥的索塔施工测量

大跨度斜拉桥索塔由于高度大，承力复杂，特备是混凝土索塔又有收缩和徐变等问题，因此，严格精细地控制索塔的施工质量，必须对其每个节段的结构尺寸、空间坐标位置，基本线形、锚箱定位等进行实时测量监控，并在局部测量的过程中，经常与全桥的总体控制测量网联网闭合作为复核。

1. 索塔施工测量的基本方法

索塔局部测量的常用方法有全站仪三维坐标法和天顶法。其测量基准点的设置与一般桥梁测量一样，应设立在比较稳定的结构物上，测量一般应在晚上到清晨气温和索塔结构温度都比较稳定的状况下进行，同时，应尽量避免在风力较大的情况下测量，以免影响测量精度。此外，对高度较大的倾斜塔柱的施工，有时应考虑其重心偏移造成的结构变形影响索塔的空间位置和产生施工内力，与设计单位商量采用适当的措施。

2. 全站仪三维坐标测量法

(1)原理

利用全站仪三维坐标的控制功能，同时测出每个测点的三维坐标，而不再进行水准测量。

(2)施测方法

在索塔施工前应先在原有桥轴线三角网的基础上进行三角网加密，注意对加密的施工控制网应结合原桥轴线三角网进行严密的平差，然后利用加密的施工控制网进行索塔的施工测量控制。

在测量时，为使全站仪每次都能架设在同心、同高程的位置上，应设置一个既能与仪器相连，又可作上下调整和平面移动的强制对中装置，使之强制性地归化到设定的位置上，然后进行固定。测量前需进行预估，并采用两测回放样测量，测量精度必须控制在允许范围之内。

①劲性骨架施工测量

劲性骨架是为拉索在索塔上定位准确而设置的，同时也增大了索塔的刚度，所以必须准确架立。由于劲性骨架高度较大，一般分节在车间内预制，现场拼装接高。安装时在上节骨架上焊一块短角钢，使上下节对中。用吊垂球的方法，控制其垂直度或倾斜率，然后用全站仪测量其顶面角点的三维坐标，符合要求后，将骨架相互焊接。如图 1-2-12 所示。

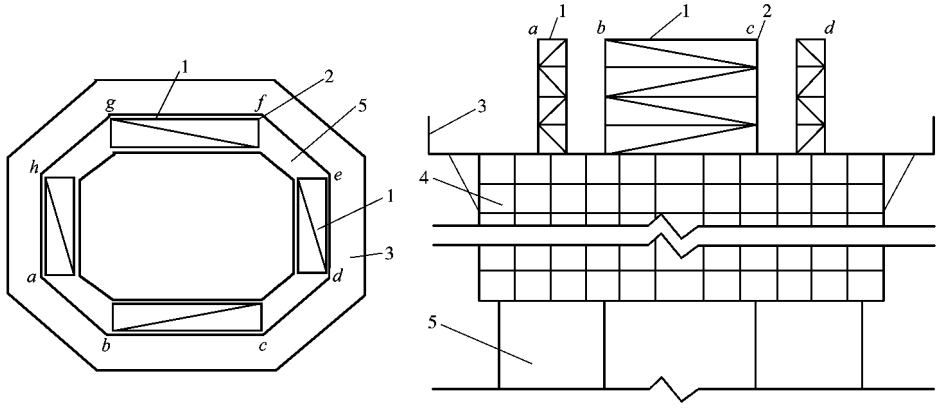


图 1-2-12　劲性骨架控制点布设

1-劲性骨架；2-控制点；3-工作平台；4-模板；5-索塔

②斜拉桥锚固箱套筒测量

锚固箱套筒的安装准确与否，直接关系到拉索锚固空间位置的准确性，其定位安装在劲性骨架定位后进行。

如图 1-2-13 所示，根据套筒的斜率、锚固中心坐标与套筒的长度，利用空间三维坐标关系推算出上下放样控制点 A、B 两点的三维坐标。

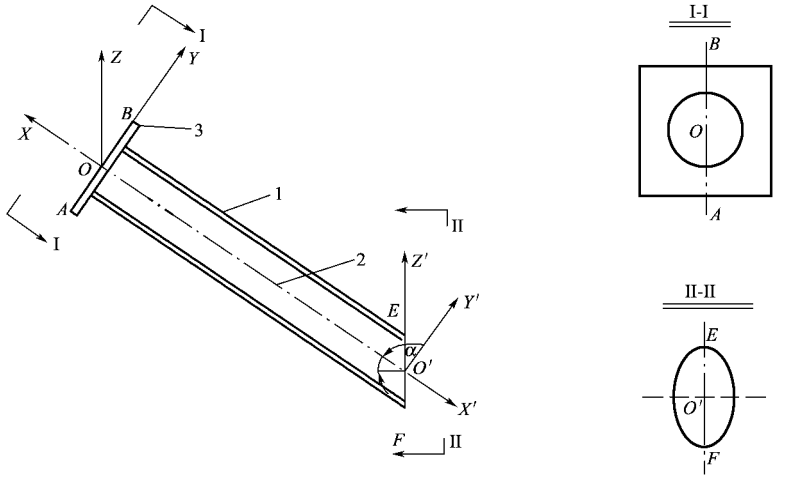


图 1-2-13　拉索套筒空间定位示意

1-拉索套筒；2-锚固中心线；3-锚垫板

根据 A、B 两点的三维坐标，利用水平尺、卷尺和垂球在劲性骨架上放样，用角钢焊设固定架，然后将套筒初步安放在固定架上，使 A、B 两点落在固定架上。

套筒稳定后，再用全站仪复核、调整到设计位置如图 1-2-14 所示。

③模板测量

对下塔柱和中塔柱，在劲性骨架和钢筋安装后即可安装模板；但对上塔柱，要等套筒安装定位后才能安装模板，安装模板前，先将底座抄平，再顺次安装内模和外模。模板连接螺栓及固定拉杆和支撑安装完毕后，再根据劲性骨架对模板进行初步定位，然后利用全站仪测量模板的角点调整就位。

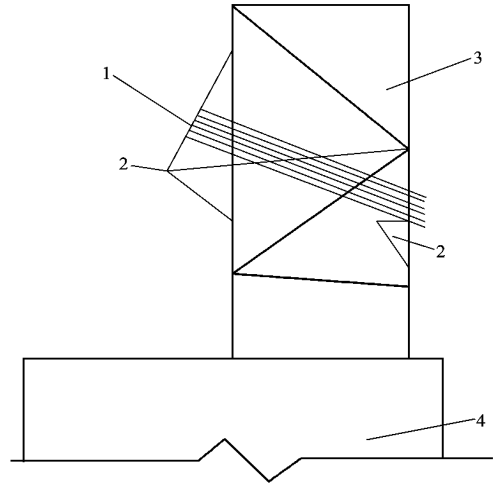


图 1-2-14　套筒定位

1-拉索套筒；2-固定架；3-劲性骨架；4-已浇索塔

3. 天顶法测量

(1)基本原理

在平面基准的传递中，利用 J2 型经纬仪的自动补偿系统，用弯管目镜进行铅直投点测设称为天顶法。该法投点直观，精度高，但受场地通视条件等限制。

(2)测设方法

①测站位置确定

下塔柱测站位置设在塔座顶部，中塔柱与上塔柱的测站，设在横梁顶面和侧面，平面位置设在纵、横中心线上，并相应离塔柱外壁一定距离(约 0.5m)，每次架设仪器前都必须强制性地

设在同心、同高程的位置上，建立固定式测站。在塔座顶部与下横梁顶部，设立柱墩形测站，下横梁侧面设钢牛腿形测站，如图 1-2-15 所示。

②强制对中装置

在柱墩形和钢牛腿形测站的顶面，需设置一个强制对中装置，如图 1-2-16 所示。

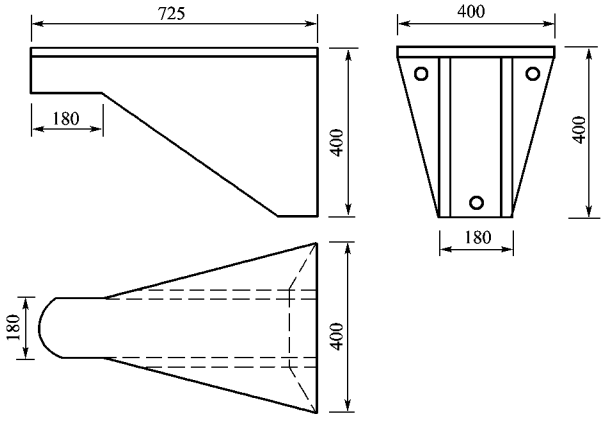


图 1-2-15　钢牛腿测站图(尺寸单位：mm)

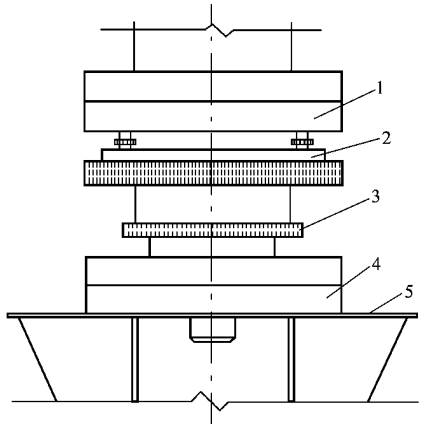


图 1-2-16　强制对中装置构造图

1-经纬仪；2-上基座；3-压帽；4-下基座；5-支承架

③目标分划板装置

当仪器设在测站上，将各点坐标随着倾斜法线向空间延伸传递时，在劲性骨架式模板的相应位置上，安装一个既能接收前视读数，又能确定方向的目标划分板装置，它由既可移动又能固定的推架和能够反光的划分板组成，具有确立位置、线条清晰、读数简便的功能。

④消除变形的影响

由于观测站设在被测结构上，在外界因素(气温、日照、风荷)的影响下，结构本身将产生变形，如此则造成了“动测量”的情况，所以在下塔柱施工中，要加强观测，对索塔承台上的施工控制网进行检测。下横梁及中塔柱施工之前，将转折点的中心点和纵横中心线利用远离承台的基准点进行复测校核，然后再重新布设施工测量基准点，使下塔柱施工阶段的形变不会影响到下横梁、中塔柱的施工，实现分段纠偏、消除累计误差。

由于索塔实际上是一个细长杆件，在气温和日照的影响下会产生差异变形，因此，在施工中应加强观测，并根据测量结果，对基准点进行修正。对变形处理的对策可归纳为：定性、定点、定量、分段、错时。

第三节　钢索塔的施工

由于钢桥塔建设成本较高、运营期维修保养要求高，国外只有一些发达国家的部分斜拉桥采用钢索塔，我国只有 2005 年竣工的南京长江第三大桥(以下简称“南京三桥”)采用钢索塔。

钢桥塔一般采用工厂分段预制、运至工地起吊安装的办法施工。为了保证现场安装的顺利，一般将预制的梁段在工厂立体试拼装。钢索塔的节段连接一般采用高强度螺栓连接、焊接、栓接和焊接混合连接等方式。

钢桥塔的安装方法一般有浮吊法、爬升式起重机法、塔吊法等。

一、浮　吊　法

浮吊法是将桥塔整体一次或分次安装的方法，日本目前最大的浮吊可起重 3500t，起吊高度为 90m，一般用于塔高 80m 以下，跨度为 500m 左右的悬索桥塔施工。具体的吊装节段由浮式起重机的吨位和高度确定。

希腊 rion 桥桥塔的上部钢锚箱部分就是采用此法安装的(图 1-2-17)，其大型浮吊的吊装性能为 6000tm，悬臂最长 40m，最大吊高 170m。南京三桥钢索塔的下部也是采用此法安装的，(图 1-2-18)。

图 1-2-17　希腊 rion 桥桥塔吊装图

图 1-2-18　南京三桥钢索塔下部吊装图

二、爬升式起重机法

首先在塔柱侧面安装护轨，安装可沿其爬升的起重机逐段起吊安装塔身。这种方法要求严格控制桥塔的铅垂度。

三、塔　吊　法

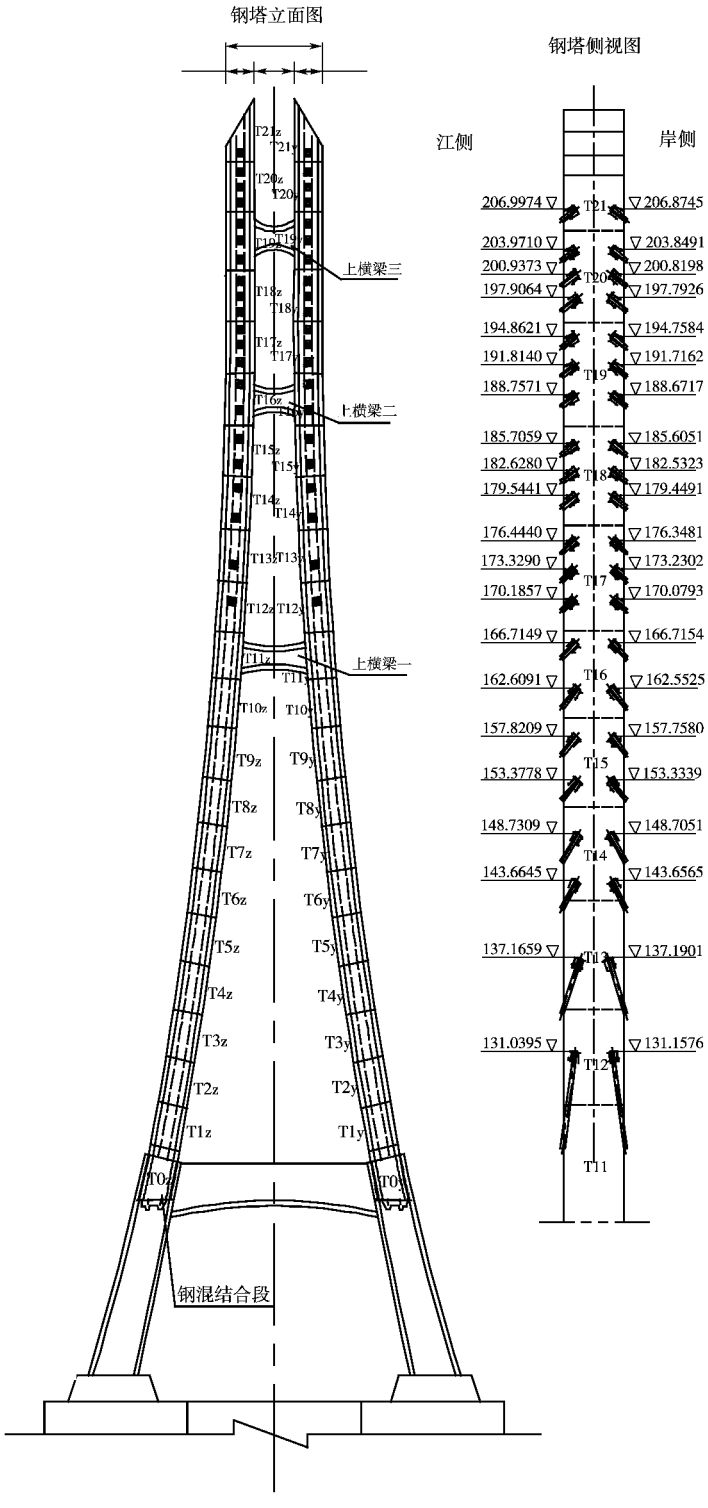
安装和桥塔完全独立的塔吊进行桥塔架设，由于桥塔上不安装施工机械，因而施工方便，精度易得到保证，但设备费用较高。南京三桥的索塔上部就是采用这种方法安装的，如图 1-2-19 所示。

图 1-2-19　南京三桥钢索塔上部吊装

1. 概况

南京三桥主桥为双塔空间索面钢箱梁斜拉桥，主桥长 1288m，主孔跨 648m。索塔为“人”字形结构，塔柱外侧圆曲线部分半径为 720m，设四道横梁，其中下塔柱及下横梁为钢筋混凝土结构。下塔柱高为 36.318m，塔柱截面横桥向宽度为 6.2～8.4m，顺桥向宽度为 8.0～12.0m。钢塔柱高 178.682m，钢塔柱共分 21 个节段，截面为等截面尺寸，横桥向宽 5.0m，顺桥向宽 6.8m。除钢混结合段外，一个钢塔柱共分为 21 个节段，编号从 T1～T21，节段长 7.7～11.42m，节段间连接采用端面金属接触磨光顶紧和高强螺栓群连接共同传力，节段质量为 106～166t。钢塔柱共设三道上横梁，从下到上为上横梁一、上横梁二、上横梁三。钢塔总质量约 12000

t。**钢塔柱概貌及节段种类如图** 1-2-20 **所示**。



钢塔柱节段统计表

节段号	长度(mm)	质量(kg)
T0	12332.2	132406
T1	8000	130575
T2	8000	129151
T3	8000	119221
T4	8000	113811
T5	8000	113811
T6	8000	113811
T7	8000	113811
T8	8000	113811
T9	8000	113811
T10	8000	113811
T11	7700	119837
T12	8200	115463
T13	7800	105481
T14	8300	111436
T15	9500	130447
T16	8400	127704
T17	9300	131512
T18	9500	133253
T19	9300	139572
T20	9000	124538
T21	11942	99825

图 1-2-20　**南京三桥钢塔柱节段种类(高程单位:**m)

钢塔柱主体结构采用 Q37qD(14MnNbq)**钢,壁板厚** 30～48mm,**腹板厚** 32mm,**壁板加劲**

肋厚 22～24mm，腹板加劲肋厚 24mm，横隔板厚 14mm，横隔板加劲肋厚 10mm。为避免钢塔柱在自立状态受风荷载作用下根部出现较大的拉应力，在 T1、T2 节段外侧设有临时预应力束。

2. 主要施工难点

(1)钢混结合段施工

①解决如何将钢塔的荷载(高应力状态)转化为混凝土中(低应力状态)。

②解决钢塔柱空中姿态的初定位。

③钢塔柱安装施工。用超常规设备对质量达约 160t 的钢塔柱节段在高空中进行安装就位。

(2)钢横梁安装施工

在垂直悬臂近 90m 的情况下进行空间合龙施工。

3. 混凝土下塔柱、下横梁施工

(1)混凝土下塔柱、下横梁施工难点在于模板的制作，因下塔柱、下横梁的各个面均为变截面，且塔柱的仰面倒角、横梁底面及倒角等为空间形体，模板加工同钢箱梁加工类似，需在胎架上进行加工制作。

(2)下塔柱施工采用的是常规翻模施工，但模板除采用刚度大的大片模板外，还采用了板面抛光和板边上刨床，使板面和拼缝更加平整和紧密，使混凝土在内在质量达标的基础上外观质量更好。

4. 钢混结合段施工

(1)剪力键施工

钢塔柱与混凝土下塔柱之间设钢混结合段，通过锚固箱及底座的壁板及腹板上开有 ϕ60mm 圆孔，穿 ϕ25mmII 级钢筋与进入该孔的混凝土形成 PBL 剪力键，钢混结合段由锚固箱(T0)、底座及底座定位件三部分组成。钢锚箱分三个舱，隔板多，PBL 剪力筋密集，且要求剪力筋必须位于孔道(ϕ60mm)的中间，加之有竖向和横向的预埋孔道，钢混结合段 PBL 剪力键钢筋的精确定位和混凝土的浇筑对施工提出了更高的要求。为此根据专家要求在后场进行 1/4 实体模型试验段。根据钢混结合段试验得出以下结论：

①主筋布置时有意识地与剪力钢筋位置错开；剪力钢筋，水平钢筋分层安放，并要求剪力钢筋钩在水平筋的外侧。

②定位角钢改竖向为横向更有利于剪力钢筋安装。

③为便于安装，可将剪力钢筋断为几截，用套筒错开剪力件孔 30cm 以上进行连接。

④纵横剪力钢筋间点焊固定，确保钢筋相对尺寸准确、牢固，防止混凝土振捣施工时出现位移。

⑤钢混结合段采用 C50 混凝土，粗集料选用 5～25 级配是满足施工要求的。混凝土采用小串桶分仓布料，每层布料厚度控制在 20～30cm，相隔仓面混凝土高差控制在 30cm 左右，使剪力键内混凝土的气泡能顺利排出。根据钢混结合段的高度和其每次浇筑不超过 2m 的要求，按每次浇筑高度 1.95m 配模板，共分 7 次浇筑。

(2)钢锚箱的精确定位

钢混结合段是 179.8m 高钢塔的基础，一方面由于钢塔柱节段是在工厂内加工好，现场安装只是场内预拼装的再现，其空间位置不能像混凝土塔柱节段一样可以逐段调节，故底座和钢锚箱(T0)的顶面空间位置要求十分准确(因其误差随着塔柱的安装呈放大趋势)，底座及钢锚

箱顶面(底座顶面、钢锚箱底面和顶面均经过铣床铣过)精度要求为:横桥向倾斜度不大于1/4500,即实测底座及钢锚箱顶面横桥向任意两点间每米高差不大于1/4.5mm;顺桥向倾斜度不大于1/6000,即实测底座及钢锚箱顶面顺桥向任意两点间每米高差不大于1/6mm;底座及钢锚箱顶面中心的纵向偏差不得大于3mm,即底座及钢锚箱顶面横轴线不得偏离索塔理论横轴线超过3mm;底座及钢锚箱相对轴线的平行度±1mm,即底座顶面纵轴线与桥轴线实测水平角不得大于2/6800rad,且底座顶面纵轴线上任一点与桥轴线间的距离最大偏差不大于1mm;两侧底座及钢锚箱顺桥向相对误差±1.5mm,即索塔横向两侧两个底座和钢锚箱顶面横轴线纵向水平距离不超过1.5mm;底座及钢锚箱预埋顶高程±1.5mm,即底座及钢锚箱顶面控制点实测高程和理论高程差值绝对值不超过1.5mm,同时要求内外形成2.7mm高差的预偏转,误差控制在±0.4mm以内。

①安装底座定位件的定位埋件。将预埋件顶面刨平,平面度在0.1mm以内,用类似水准仪调平原理的机构来调整埋件板顶面的高程和水平,再支模板(模板一边放大20cm)浇筑混凝土至控制高程。用这种方法预埋的埋件平面位置(20mm以内)和高程(0.2mm以内)均能满足要求。

②底座定位件与底座联合体安装。将底座和底座定位件作为整体,用浮吊吊装,通过对线初步就位。用双向千斤顶调整其前后、左右、上下位置,使底座顶高程和平面位置满足设计要求并经过验收后,用角钢将定位件与定位埋件点焊固定,再复测无误后方可小限量焊接,并用型钢将底座固定。

③锚固箱安装。包含底座的混凝土浇筑后,对底座的高程和轴线再次进行测量,测量结果将指导钢锚箱空间位置的调整。锚固箱为箱型钢结构,质量118t,支立于底座顶面。锚固箱(T0段)采取镇航工818、1200t固定扒杆浮吊吊装。与安装底座及底座定位件方法相同,精确调整锚固箱。

(3)钢锚箱施工测量

①准备工作

根据测量误差来源分析,除加密点采用强制对中观测盘以外,T0段顶面的特征点均采用强制对中观测盘,并用高强螺栓与T0段连接。

②调整过程

在下横梁处加密点上设置全站仪用极坐标法调整T0段的平面位置。此次是粗调,偏差在5mm左右即可。

在T0段顶面设置精密水准仪,实测其高程和端面倾角,并对偏差进行调整,直至满足设计要求。

再次利用下横梁加密点对T0段进行平面位置的调整,直至满足设计要求。由于T0段在一个平整的面上进行平面位置的调整,所以第三次对平面位置的调整一般不会对高程和倾角造成影响。

调整完毕后,对T0端口进行全面测量,作为初始定位资料。

③变形观测

由于受混凝土徐变、收缩以及温差等因素的影响,T0段在后续的施工中,其空间位置与初定位时相比,会发生了较大的变化,设计要求在下塔柱和下横梁施工期间对T0段进行变形观测。

由于下横梁处的加密点受施工干扰较大,在对T0段的变形观测采用的方法有:在距离主

塔 320m 处的过渡墩墩顶上设置工作基点 JM02；在 T0 段上直接设置全站仪测量上下游塔柱顺桥向轴线之间南北端口的水平距离；在 T0 段顶面设置 NA2＋GPM3 直接测定塔段的端面倾角。

观测时间选择在晚上 22：00 至次日日出之前，技术要求参照《公路勘测规范》(JTJ 061—99)中一级导线测量技术要求和二等水准要求执行。数据处理依据测角与测距的标称精度进行权匹配后对误差进行分配。

从北塔所测数据可知，T0 段在不同的工况下是有变化的，其主要的变化量为横桥向的位移和顶端口的横桥向倾角。(上游塔柱向内侧位移约 8mm，下游塔柱向内侧位移约 12mm)。

(4)钢锚箱施工工艺要点

①钢混结合段通过类似水准仪调平结构精确调平和二次浇筑精确定位埋件，再用双向千斤顶进行钢混结合段空间位置的调整，逐步逼近，使之达到要求。

②PBL 剪力键的使用为大型钢结构将荷载传递给混凝土提供了范例。同时 PBL 剪力键钢筋的特殊性引起支模和混凝土浇筑工艺质的变化。

③由于钢混结合段在由横梁连接的塔柱部位，其空间位置受混凝土横梁弹塑性收缩徐变影响，因此，在本钢塔柱安装节段中设置 3 个完全螺栓调节段以备调整。

5. 钢塔柱节段施工

(1)T1 节段吊装

T1 节段采用镇航工 818、1200t 固定扒杆浮吊吊装，吊装时，镇航工 818、1200t 浮吊就位于北侧，采取一副钩、四点吊装。

使用 1200t 浮吊安装 T1，采用 POTAIN 可调节倾斜度吊具。安装时，利用 5t 或 10t 手拉葫芦辅助，使 T1 段初定位，然后用千斤顶调整对线精定位。T0 节段上口安装调整工装，测量直接对 T1 节段上口进行测量，通过工装对 T1 节段进行调整。当 T1 节段上口验收满足要求后，在 T0 节段与 T1 节段接口先通过工艺拼接板连接固定，后量配拼接板。进行 T1 节段与 T0 节段间的连接。钢塔柱间连接与定位钢塔柱节段间采取拼接板外加高强螺栓的结构形式。

该桥钢塔柱各节段设计采用高强螺栓连接，节段间传力方式为金属接触传力，所以钢塔柱的架设精度很大程度上取决于其加工制作精度，但由于不可能在加工厂对其进行全塔立式匹配以及桥位现场复杂的外部荷载等因素，在桥位架设钢塔过程中必须进行精密测量，以获得钢塔的精确三维姿态，供监控部门进行监控和在可调节段进行修正。

采用 TCA2003 全站仪进行位置测量和日本索佳 PL2 水准仪进行高程测量，平面控制点布置在过渡墩上，高程控制点采取用吊钢尺法从承台上水准基点多测回引测至下横梁顶。

设计在加工厂对 T1 段专门设置了一套测量标示点系统，根据设计的要求，将所测的数据、数据间的相互关系提供给设计，由设计对数据进行分析，给出下一节段的理论值。

①钢塔柱的架设精度管理架设精度以钢塔柱的垂直度来体现。桥位现场架设钢塔柱，影响架设精度的外部因素主要为：附着在钢塔柱上 MD3600 直立式塔吊(用于起吊钢塔柱各节段，质量约 900t)；日照等外界气象因素引起的温差效应；其他施工荷载。

外部荷载对钢塔架设精度的影响随着塔柱的升高而增大，部分外部荷载同时会由于施工原因而转化为钢塔内应力，从而最终影响裸塔的成塔精度。

②钢塔柱测量。

测量时间及手段的选择。因为钢塔对温度的变化敏感，每次测量时间选择在日落 4h 后进行，使钢塔有足够的时间均温。采用全站仪法来进行钢塔柱垂直度监测。

测量仪器的选取。TCA2003 全站仪 1 套(精度指标:测距 1+1ppm,测角 0.5s);PL2 水准仪 1 套(精度指标:0.3mm/km)。

测量内容。南北向端口顺桥向轴线之间的水平距离;塔段岸侧壁板上四个平面控制点;塔段顶面纵横轴线;塔段顶面南北向和上下游向的端面倾角;上下游塔段之间的高差测量。

(2)钢塔柱安装的关键设备(以 POTAIN MD3600 塔机为例)

①POTAIN MD3600 塔机简介。南京三桥采取法国波坦公司 3600t·m 塔机和相关技术解决钢塔的吊装问题。目前该塔吊是直立式塔吊中起重能力之最。POTAIN 对塔吊基础的要求较高。

允许变形。塔机柱脚两点最大绝对水平位移为+/-5mm。塔机柱脚两点最大相对垂直位移为+/-5mm。

吊机最不利工况荷载。按最不利工况时塔机支撑托架支反力:+2818kN;-1778kN;-1778kN;-6375kN。最大扭矩:1526kN·m。剪力:253kN。

支脚安装误差:1mm。根据这个要求,经过比较确定塔吊基础为安设在承台上的空间刚架。

②POTAIN MD3600 塔机支撑拖架简介。塔吊支撑托架采取支撑悬挑框架结构形式,支撑拖架总质量约 380t。

③塔吊安装。塔吊包括标准节、套架、顶升节、转盘、大臂、平衡臂等构件,由于和下横梁间距不够,采用 1200t、吊高 70m 浮吊进行安装。

④用 200t 水箱进行试吊。

⑤塔吊共设四道附墙。

⑥塔吊的顶升和拆除。塔吊顶升时,通过套架自爬,依靠辅助吊机将节段分半片吊上去安装,然后再顶套架,反复之实现顶升。拆除时按照逆过程进行,由于塔吊和塔柱间距因素,部分节段通过塔顶小塔吊辅助拆除。最后大臂等仍用 1200t 浮吊拆除。

⑦塔吊和其基础的监测。在塔吊使用过程中,根据指挥部的要求,对塔吊及其基础进行了应力、应变、位移的监测,塔吊各构件应力、应变均在容许范围内;基础最大位移接近其限值,但应力非常小,最大值均在 100MPa 以内,主要是刚度控制。

(3)吊具

钢塔柱节段吊装采用 POTAIN 公司生产的专用吊具,吊具通过受拉油缸实现倾斜角度的调整。

(4)钢塔柱一般节段施工

钢塔柱高 179.80m,标准节段有 21 节,并有三道钢横梁。从 T2 节段开始钢塔柱节段采用 POTAIN M3600 塔机进行吊装,最大吊装质量不超过 170t。

①架设流程。钢塔柱的架设流程如图 1-2-21 所示。

②钢塔柱一般节段架设。塔柱节段吊装时,将吊具对准吊耳,通过吊具上的伸缩油缸,初步调整吊具的倾斜角度,系缆风绳,待吊到位后再进行精调。为使下一架设节段能够较容易地插入,在已安装节段与待按节段间安装临时导向件进行初定位,然后用千斤顶精确调整对线定位。

(5)塔肢间横撑施工

①主动横撑简介。钢塔柱共设主动横撑六道,第一、二、三、四道为主动横撑;第五、第六道主动横撑为便于安装钢横梁二、三时使用。每道横撑施加水平力时,均需对塔柱横向位移及空间姿

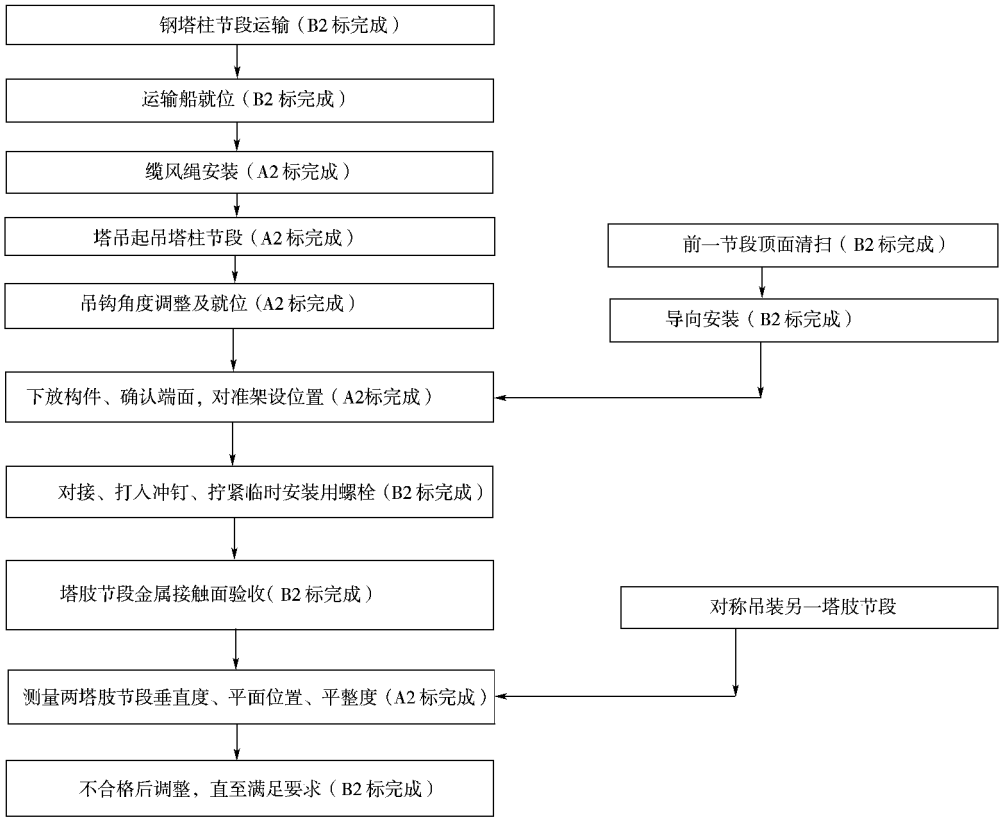


图 1-2-21　**钢塔柱的架设流程**

态进行控制，塔柱内应力值为辅助控制指标。钢塔柱横撑布置于钢塔柱节段连接处的倒角处。钢塔柱横撑采取千斤顶进行对称顶推，千斤顶顶推处位于横撑横桥向的中心（桥轴线上）。

②主动横撑加工制造。主动横撑采取后场分块制造并试拼，利用塔机进行吊装。如图 1-2-22**所示。利用塔机安装立柱整体，再安装水平撑，立柱顶设有型钢，将水平撑前后、垂直向上进行限位。根据设计吨位，利用液压千斤顶在桥轴线处对水平撑施加横桥向水平力。钢支撑与钢塔柱间用螺栓连接，用钢板连接两端横撑的三面，另一面留出千斤顶的出口，液压千斤顶施加水平推力 。横撑上安有走道，在顶推处横撑上搭设顶推施工的作业平台。千斤顶顶推**

图 1-2-22　**塔吊吊装主动横撑**

时务必保证横撑水平，横撑顶推端口与垂直线齐平。顶推后，钢板与两端横撑及时焊接。

6. 钢横梁施工

钢塔柱共有三道钢横梁，采用 MD3600 塔机进行吊装。以上横梁一为例，介绍钢横梁的安装。

上横梁长 7980mm，宽 5600mm，高 5343mm，单件质量 57.6t。上横梁与塔柱间采取异步安装，横梁装饰块与横梁异步安装。先安装塔柱 T11 节段，在塔柱 T11 节段拼接板处安装主动横撑，主动横撑安装后吊装上横梁一（上横梁一两端与塔柱 T11 节段间有 10mm 缝，上横梁两侧与主动横撑间有 50mm 缝）。其施工步骤为：第一步，钢塔柱安装至 T11 节段；第二步，钢塔柱内第四道主动横撑安装，第四道横撑不设立柱和水平连，采用螺旋千斤顶在两端型钢间施加水平推力，横撑顶推端口与垂直线齐平；第三步，上横梁一吊装与就位。

上横梁一采取四点吊装，钢丝绳上部与 MD3600 塔机大钩连接，下部与 4 个 35t 卸扣连接，卸扣与钢箱梁上吊点连接。另用 4 个 10t 葫芦加在大钩和另外四个吊点上，用以调节横梁顶面的水平，当横梁缓慢下放时，密切注意两边的间距，以不与塔柱接头相碰撞为前提，四个拐角安派人员检查、手扶控制其转动并相互密切联系，确保安全到位。通过冲钉先安装一头拼接板，随着温度变化逐步安装另一头的拼接板，完成安装。

上横梁一是在塔柱悬臂 90m 的情况下进行吊装，由于塔柱加工制造、安装、监控得当，匹配件没有采用现场现配及扩孔等措施，钢横梁仅用 2h 即安装到位，所有螺栓通过冲钉及温度变化均一次安装到位，实现上下游塔柱自然合龙。

按此种方法，上横梁二、上横梁三均顺利吊装就位。

7. T21 节段施工

(1)T21 节段简介

钢塔柱 T21 节段长 6800mm，宽 5000mm，高 11942mm，重 101.3t，形状与标准节段差异较大，上部有一个大切角。因 T21 节段的构造与标准节段的差异，以前设计的吊耳不能满足吊装要求，故对 T21 节段吊耳另行设计。

(2)吊具构造

采用 POTAIN 专用吊具，吊具下每吊点下穿 ϕ140mm 销轴，销轴内 ϕ43mm 钢丝绳（L=13m）走双，每吊点钢丝绳下挂 50t 卸扣，卸扣与钢塔柱 T21 节段吊耳铰接。

8. 塔柱施工过程中的防震措施

钢塔柱制震装置由两部分组成：TMD 及其安装平台和 TLD 及其安装平台。

(1)TMD 安装

TMD 外轮廓尺寸为：长 2620mm，宽 1460mm，高 3110mm。TMD 主要由下部主梁、上部主梁、立柱、摆梁、摆杆、摆箱、吊耳、弹簧箱、阻尼器等部件组成。其中，摆杆和摆梁之间通过调心球轴承连接，弹簧箱及阻尼器与摆梁及下部主梁之间用销钉连接。

TMD 通过三角支架与塔柱节段连接，三角支架分为两部分，塔柱 T10 节段安装一组，塔柱 T15 节段安装一组。当钢塔柱吊至 T12 节段时，将 TMD 吊至 T10 段的三角支架上组装；当塔柱吊至 T16 节段时，应将 TMD 移至 T15 段的三角支架上。三角支架由槽钢、角钢、钢板组成，上面安有安全护栏。

(2)TLD 安装

TLD 外轮廓尺寸为：长 4420mm，高 1895mm。TLD 主要由水箱、隔栅、连接支座组成，安装于上横梁二上面。水箱分为 4 个部分，工厂制作，现场组装。TMD 通过三角支架与塔柱节

段连接，三角支架分为两部分，塔柱 T10 节段安装一组，塔柱 T15 节段安装一组。当钢塔柱吊至 T12 节段时，将 TMD 吊至 T10 段的三角支架上组装；当塔柱吊至 T16 节段时，应将 TMD 移至 T15 段的三角支架上。三角支架由槽钢、角钢、钢板组成，上面安有安全护栏。

9. 成桥后塔柱实测结果

(1)A2 标 T20 节段中心坐标偏差、垂直度、轴线两边相对位置高差。

上游塔柱：δ_y = +32.2mm，1/8800；δ_x = +31.4mm，1/6500；-0.7mm、-0.6mm、-0.6mm、-0.6mm、0.0mm、-0.4mm、-0.4mm、-0.1mm。

(2)**下游塔柱**：δ_y = +18.0mm，1/11000；δ_x = +24.3mm，1/8400；-0.3mm、-0.3mm、-0.4mm、-0.6mm、-0.2mm、-0.2mm、-0.1mm、0.1mm。

(3)A1标 T20 节段中心坐标偏差、垂直度、轴线两边相对位置高差。

上游塔柱：δ_y = +1mm，1/200000；δ_x = -16.6mm，1/12000；-0.6mm、-0.6mm、-0.3mm、-0.7mm、-1.1mm、-1.4mm、-1.7mm、-1.0mm。

下游塔柱：δ_y = +4.4mm，1/46000；δ_x = -27.2mm，1/7500；0.8mm、0.5mm、0.5mm、0.4mm、0.6mm、1.1mm、1.2mm、0.9mm。

(4)经检查钢混结合段目前没有发现任何裂缝。

(5)钢塔柱安装过程中各部分应力均在监控允许范围之内。

10. 钢塔柱的特点

(1)施工速度快。北塔施工在前，钢塔柱安装处在摸索阶段，整个钢塔柱安装用了 3 个月的时间，而南塔在北塔施工经验的基础上仅用 2 个月的时间就完成了钢塔柱安装。

(2)环保。钢塔柱全部采用钢材作为原料，现场安装施工不会产生污染，且数百年之后，钢材可以回收利用，实现可持续性发展。

(3)钢塔柱安装为工厂内预拼装的再现，安装精度高，质量品质稳定，且现场安装劳动强度低。

(4)由于钢材的均匀性和高强度，钢塔柱造型美观，外形尺寸小，内腔空间大，且具有较强的抗震能力。

第三章 主梁施工

DISANZHANG

第一节 斜拉桥主梁概述

一、斜拉桥主梁的结构形式

由于斜拉桥主梁的支承形式为多点连续支承，而且支承间距较小，与梁式桥相比，斜拉桥的主梁梁体高跨比较小，因此，显得比较纤柔。

以材料分，大跨度斜拉桥的主梁有混凝土主梁、钢主梁、钢-混凝土结合梁、钢-混凝土混合梁等；以横截面形式分，有箱形主梁、π形肋板式主梁（边主梁）、板式主梁等；按照索、塔、梁之间的不同结合方式，又有飘浮体系、支承体系、塔梁固结体系及刚构体系等。

二、斜拉桥主梁常用的施工方法

斜拉桥常用的施工方法有支架法、悬臂法、平转法、顶推法等，对大跨度斜拉桥而言，比较适用的是悬臂法，有时也辅以支架法。

1. 悬臂法

悬臂法分为悬臂浇筑法和悬臂拼装法。悬臂浇筑法是在已经形成的塔下主梁0号块上安装尾部相对的两个挂篮，向远离塔的方向逐段对称浇筑混凝土主梁的方法；悬臂拼装法是在塔下主梁的0号块上安装吊架逐段对称吊装主梁节段的方法。对于跨度过大的斜拉桥，有时也在跨间设立临时支墩以减小悬臂施工长度。

2. 支架法

支架法主要作为斜拉桥主梁0号块的施工，或边跨主梁端部区域的施工辅助方法。

三、斜拉桥主梁悬臂施工的临时固结措施

当主梁结构采用漂浮体系时，为了防止主梁在悬臂施工过程中因荷载不平衡而产生倾覆，包括梁段本身的不平衡、风载、索力产生的不平衡等，一般采用在梁底设置临时支座，并用预应力钢筋或钢绞线将主梁锚固在桥塔的横梁上。为了成桥后拆除方便，临时支座常用硫磺砂浆支座，在成桥后通电即可融化去除。但应注意的是，若悬臂施工的时间太长，硫磺往往会腐蚀

电阻丝，造成拆除困难。对于塔梁固结的斜拉桥，则无需采取临时固结的措施。另外需要注意的是，在成桥后拆除临时支座时，结构体系随即转换，有时会引起主梁的纵向位移，控制不好可能发生不安全事故，必须引起高度重视。斜拉桥主梁固结如图 1-3-1 所示。

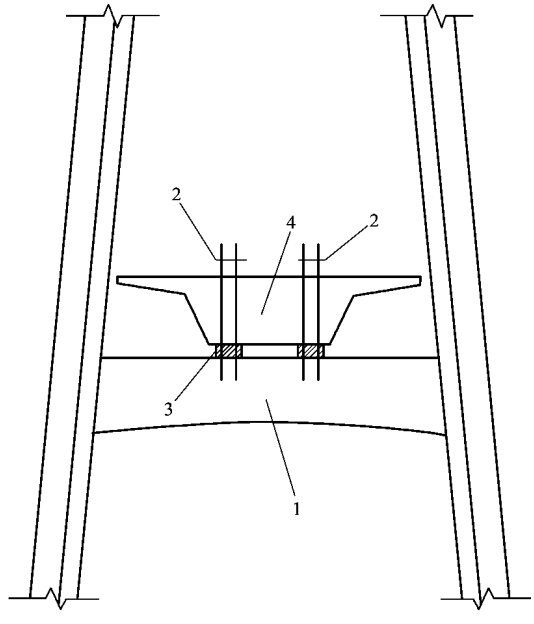


图 1-3-1　斜拉桥主梁固结

1-下横梁；2-锚筋；3-临时固结支座；4-0 号块

第二节　斜拉桥混凝土主梁的悬臂浇筑施工

一、斜拉桥混凝土主梁悬臂施工的特点

与混凝土梁式桥的悬臂施工相比，斜拉桥由于具有斜拉索逐段提供的支承，一则可以承受已施工梁段的重力，二则对于悬臂浇筑而言，拉索接长可以与挂篮前端相连，承受挂篮施工约一半的荷载，因此，斜拉桥的悬臂施工可以实现比梁式桥更长的跨度，而且对于悬臂浇筑施工又可使挂篮的结构简化，质量减轻。因此，斜拉桥的悬臂施工因拉索的存在而比梁式桥具有更大的优越性。

但是，由于斜拉索的存在，主梁的超静定次数增加，受力更为复杂，使得对悬臂施工的工艺要求更严、控制精度更高，对混凝土收缩徐变影响的计算和控制更难。

二、悬臂浇筑的施工程序

1. 斜拉桥悬臂的主要步骤

斜拉桥悬臂浇筑施工的主要步骤为：0 号段施工→安装挂篮→各段悬臂灌注→各段安装拉索并张拉→合龙→必要时调索。

2. 0 号段(无索区)施工

0 号段施工与一般梁式桥基本相同。多在承台或塔座上搭设支架现浇。如图 1-3-2 所示。0 号段的设置长度应能保证悬臂施工挂篮有足够的拼装场地，并将无索区包含在内。

3. 安装挂篮

0 号段施工完成后，即可在其上安装挂篮。安装挂篮一般用吊机进行，水上一般用浮吊进行。如图 1-3-3 所示。

图 1-3-2　斜拉桥 0 号段(无索区)现浇

图 1-3-3　挂篮安装图

4. 逐段悬臂浇筑施工

(1)挂篮的种类及简介

斜拉桥的悬臂浇筑挂篮主要有：长平台牵索式挂篮和短平台牵索式挂篮。

①长平台牵索式挂篮

长平台牵索挂篮一般仅在混凝土主梁下设置挂篮平台，且已成梁段下的挂篮平台长度一般要略长于待浇梁段下的挂篮的平台长度，因而使挂篮的总长度很长，其目的一是为了挂篮的走行，二是为了保证挂篮在顺桥向的刚度。由于自重较大，将导致挂篮挂钩处在走行时集中力较大而需增大主梁截面，增加工程费用。

长平台牵索挂篮的结构构造：如图 1-3-4 所示为一常备杆件组拼式长平台牵索挂篮的基本结构构造，其主要由主桁承重系统、模板系统、牵索系统、锚固系统、走行系统及调高系统等组成。

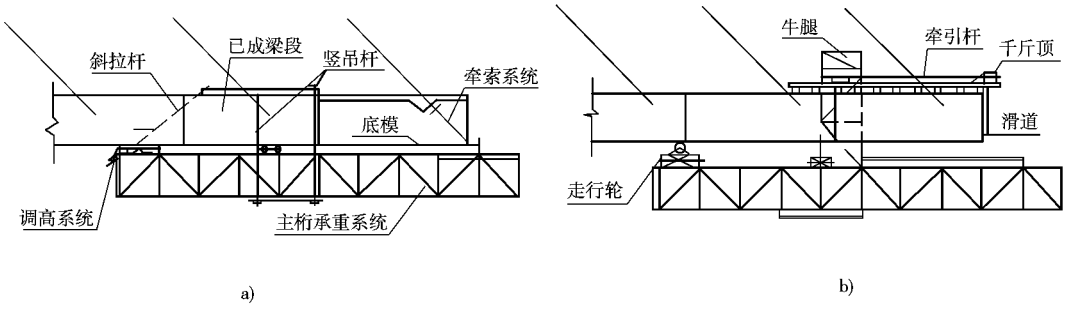


图 1-3-4　组拼式长平台牵索挂篮结构图

a)灌注立面图；b)走行立面图

主桁承重系统：根据梁段的尺寸及自重，主桁纵、横向可分别由数榀组拼式桁梁组成，其各榀桁梁之间的间距可根据需要调整。在外侧桁梁前端一定长度范围内设置与牵索系统连接的锚固滑槽，在纵向桁梁中间区域设置吊挂式走行牛腿。在灌注梁段期间，施工荷载传于主塔及已灌梁段上，挂篮通过走行牛腿及尾端横梁上的走行轮前移时，其自重全部传给梁部。

模板系统：由底模、外侧模、内模等组成，底模一般采用型钢及钢板焊成的整体格构。外侧

模在标准节段采用钢模，在牵索锚块附近一般宜采用钢木模结合。内模一般也采用钢木模结合。

牵索系统：如图 1-3-5 所示，牵索系统由异形接头、牵引杆、吊耳、水平调整螺杆、扁担梁、元宝梁及千斤顶等组成。吊耳位于固定在主桁上的锚固滑槽内，元宝梁与吊耳之间采用销轴连接。千斤顶的作用是调整缆索至正确的位置和完成体系转换。在每梁段施工期间，利用牵索的竖直分力抵消挂篮前端的竖直荷载，再通过主索将力传给主塔，之后缆索则按设计锚固在主梁上。

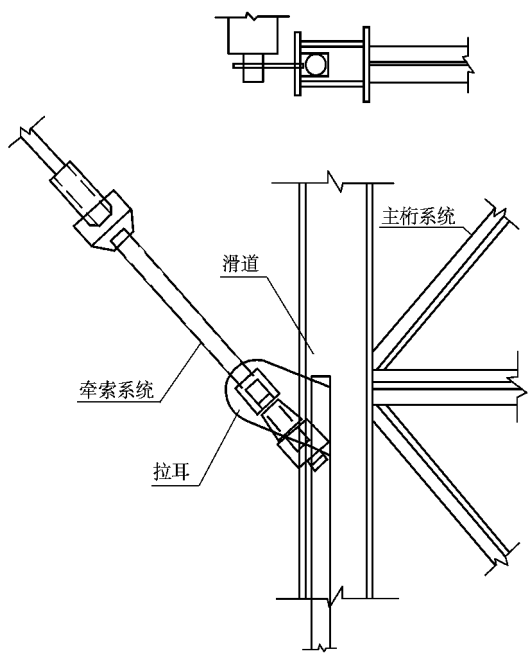


图 1-3-5　牵索系统示意

锚固系统：可分为中锚和后锚两部分。

如图 1-3-6 所示，中锚一般由上下锚梁、分配梁、扁担梁、竖吊杆、斜拉杆及千斤顶等组成。千斤顶安装在上锚梁与扁担梁之间，用来安装及拆除锚固系统，值得注意的是，对于一般的双室开口预应力混凝土箱梁，位于开口区域的中锚斜拉杆的水平分力互相平衡，而位于两侧翼缘部位的中锚的水平分力则与前端牵索的水平分力相互抵消。此外，在安装开箱内模时，其上的中锚系统的上锚梁作为悬臂吊装设备，而在挂篮前移时，两侧翼缘上部的中锚则以垂直吊杆通过千斤顶将挂篮主桁落在走行滑槽内，总而言之，中锚的主要作用是将承受的竖直荷载及水平力传给主梁。

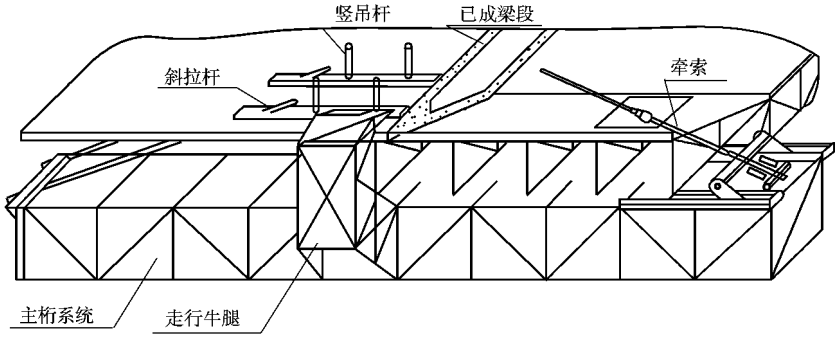


图 1-3-6　锚固系统布置

后锚由小锚梁和拉杆等组成，它位于挂篮的尾部。拉杆上端锚固在主梁顶的小锚梁上，下端锚固在桁梁上。其作用是将挂篮的尾部与主梁锚固联接。

走行系统：由滑块、滑槽、走行轮、牵拉杆及穿心式千斤顶等组成，滑块安装在走行牛腿上，滑槽铺在主梁顶面，走行轮安装在尾端调高楔块上。当挂篮灌注完一梁段后，用千斤顶通过牵拉杆将挂篮移动到下一段。

调高系统：由楔块组成，其位于挂篮的中间和尾端横梁上，挂篮就位时用其调整高程，挂篮走行时尾部调高楔块可兼作走行轮安装架。

长平台牵索挂篮的施工程序及工艺要点如下。

挂篮安装：在主梁的 1 号、2 号梁段适当位置预设 4 个吊孔，用倒链或千斤顶将组拼成整体的主桁承重系统和底模板整体提升到安装位置，安装牛腿顶端部分，若主桁未到安装位置，则安装走行系统，使其走行到位。同时安装梁上的锚固部件，并拆除走行轮，将主桁锚固。之后安装外侧模、开箱内模，绑扎钢筋，并安装牵索系统，经精确调整后即可灌注混凝土。

挂篮前移：梁段混凝土等强张拉预应力束后，解除锚固系统的斜拉杆及有关模板的连接，铺好梁顶走行滑槽，用锚固系统的垂直吊杆将挂篮主桁等缓缓下落，直至梁侧牛腿落在滑槽内。之后解除垂直吊杆，卸去梁底楔块，换装走行轮，在主梁上用千斤顶和牵拉杆带动牛腿将挂篮缓缓平行前移，并在后方设链滑车作保险制动。

挂篮就位及调整：挂篮到位后，先将两侧中锚的垂直吊杆临时锚固，再将有关的锚固件和模板前移安装，再用中间的中锚吊杆将主桁提升并进行相应锚固，然后精确调整后即可施工下一梁段。

挂篮施工要点：锚固吊杆及斜拉杆的预留孔一定要准确，以保证各杆不受弯；锚固系统的垫梁及滑道与主梁的接触面一定要平整，必要时进行整修，以保证受力合理可靠；主梁底部的调高楔块要与梁底顶紧，以保证梁段间顺接。

②短平台复合型牵索挂篮

短平台复合型牵索挂篮结构构造：图 1-3-7 所示为一型钢组焊式短平台复合型牵索挂篮，其由挂篮平台、三角架和伺服系统三大部分组成。

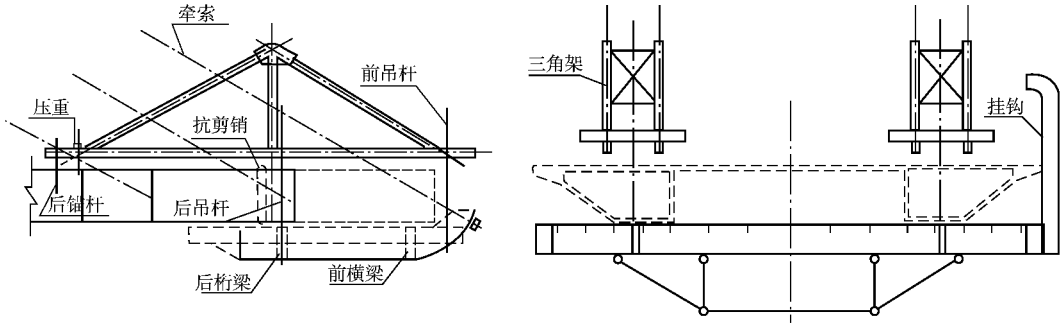


图 1-3-7　短平台复合型牵索挂篮

挂篮平台：它由前横梁、后横梁、牵索纵梁、普通纵梁、尾梁、水平桁架和纵梁平联组成，前、后横梁为箱形截面的刚性主梁与平弦桁架的组合结构。

三角架：由刚性的下弦梁和其上的三角式桁架形成的组合结构。

伺服系统：其由牵索系统、悬吊系统、走行系统、锚固系统、水平支承系统、微调定位系统等组成。

牵索系统由斜拉索和其梁下锚具以外的其他锚具及连杆组成，其作用是把挂篮前端的荷载传给主塔。

悬吊系统由前后横梁上以销轴安装的四根吊杆、扁担梁及千斤顶组成，千斤顶用作调整高程及升降挂篮，在灌注梁段时，两根后吊杆承受挂篮后支点的全部荷载，而前吊杆则通过测力系统在一定受力范围内与牵索共同承受挂篮前端的荷载。

走行系统分为三角架走道和挂篮后端挂钩走道系统。

三角架走道设于三角架下弦梁下，由槽钢和聚四氟板组成，固定在桥面上。后端走行系统由 Γ 形挂钩及走道组成。

如图 1-3-8 所示，水平支承系统由抗剪柱、水平螺旋支顶及滚轴等组成，其垂直穿入箱梁的预留孔中，以抵抗牵索产生的水平分力。

微调定位系统的功能是靠安装在三角架走道上的纵横向千斤顶和三角架后支座处的可调高结构，以及安装在挂篮后横梁上的手动千斤顶实现的。

锚固系统包括弧形承压锚碇系统和三角架后端锚固系统。

如图 1-3-9 所示，弧形承压锚碇系统是由牵索纵梁前端的弧面及锚座等组成的，锚座在一定角度范围内滑移时，牵索施力方向均在弧面法向线上。

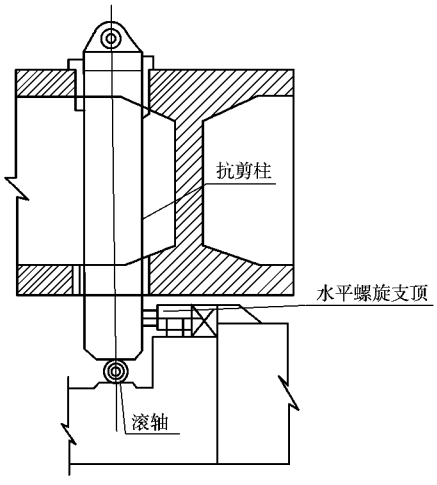


图 1-3-8　水平支承系统

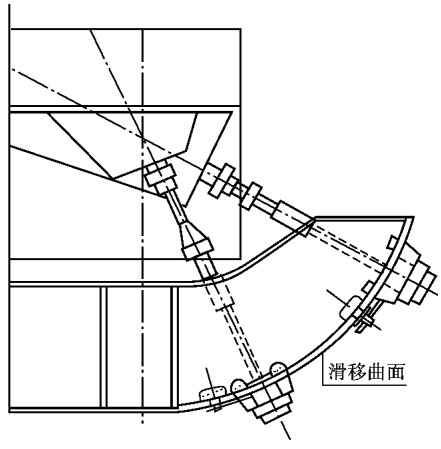


图 1-3-9　弧形承压锚碇系统

三角架后端锚固系统由预埋在主梁中的锚板、夹板及吊耳和接至三角架尾端的后锚杆等组成，其作用是抵消三角架在施工时产生的倾覆力矩。

短平台复合型牵索挂篮的施工程序及工艺要点如下：

挂篮安装：塔下用作组拼挂篮的主梁施工后，将挂篮三角架及其后锚等构件吊上桥面安装就位，然后用倒链或卷扬机将整体组拼的挂篮平台提升，并安装相关的伺服系统，检查无误后灌注混凝土。

挂篮前移：梁段混凝土等强张拉预应力束后，解除挂篮牵索并与主梁锚连，将挂篮平台下放一定高度，然后将挂篮三角架向前移动一个梁段长度，到位后再将挂篮平台沿梁顶滑道和三角架下弦梁下翼缘前移就位，上述为两次走行，适应梁宽且重的情况。若梁较窄和较轻时，也可一次走行到位，即利用梁顶滑道将两个三角架和其悬吊的平台同步前移。

挂篮就位及调整：利用链滑车将平台提起，安装吊杆及牵索等，然后精确调整后即可施工下一梁段。

挂篮施工要点：灌注混凝土时，由于挂篮前端荷载由牵索和前吊杆共同承受，为保证前吊杆不超载，利用千斤顶和特设的数字式压力传感器测其杆力，超出其设计受力的部分通过分次调整临时牵索来平衡。

(2)各类牵索挂篮的力学特点

各类牵索挂篮的共同特点是，改变了普通挂篮单纯吊挂传力给主梁的方式，采用吊挂和牵拉相结合的传力方式将荷载分别传给主梁和塔，从而大大减小了主梁的受力，避免了因施工原因不得不加大主梁截面和增加布筋，使得大跨斜拉桥的一个索间梁段一次悬浇成为可能。

长平台牵索挂篮在灌注混凝土时，前端荷载靠牵索拉力的竖向分力抵消，后端荷载主要靠

锚固系统的竖吊杆承受，锚固系统的斜拉杆则主要是为了平衡牵索拉力产生的水平分量。而其在前移走行时，则主要由吊挂牛腿承担挂篮重力，此外，由于平台在牛腿前部重，后部轻，则后部的走行轮紧抵主梁底面滚动，使挂篮稳定的平行前移。总的来说，挂篮的刚度和整体性是较强的。

短平台复合型牵索挂篮在灌注混凝土期间，前端荷载由牵索拉力的竖直分量和前吊杆的有限拉力抵消，这里前吊杆的主要作用是弥补挂篮由于底平台较短而竖向刚度差的缺陷。由牵索拉力产生的水平分力则由水平支承系统传给主梁，而后吊杆则承担挂篮后端荷载并将其传给主梁底板。前移行走时，则除了挂篮后端由Γ形挂钩系统代替了滑梁吊挂系统外，其与普通的三角斜拉式挂篮的前移走行方式基本相同。

(3)各类牵索挂篮的使用特点

就挂篮的走行而言，长平台牵索挂篮为一步到位，而短平台复合型牵索挂篮分两步；就施工控制而言，前者因纵向长度较大，要求更严些；而对灌注混凝土而言，由于后者前部由前吊杆和牵索共同受力，故应严格控制吊杆的受力，以防超载。

(4)各类牵索挂篮的适用性分析

由于常备杆件组拼式长平台牵索挂篮取材较易，大部分杆件可有多种用途，故一次摊销成本可能较低，对于跨度不是很大，且挂篮利用率不是很高的情况较适用，而型钢组焊式短平台复合型牵索挂篮由于是用型材特殊加工而成，故成本较高，但其结构简洁紧凑，使用较为方便，适用于跨度较大且利用率较高的情况。

三、斜拉桥悬臂浇筑施工实例

1. 斜拉桥边主肋梁长平台牵索挂篮悬臂浇筑施工实例

(1)工程概况

如图 1-3-10 所示，某大桥主桥为 PC 梁独塔斜拉桥，主桥主跨 252m，边跨 175m，索塔高 154.11m，桥面以上高 116.90m。

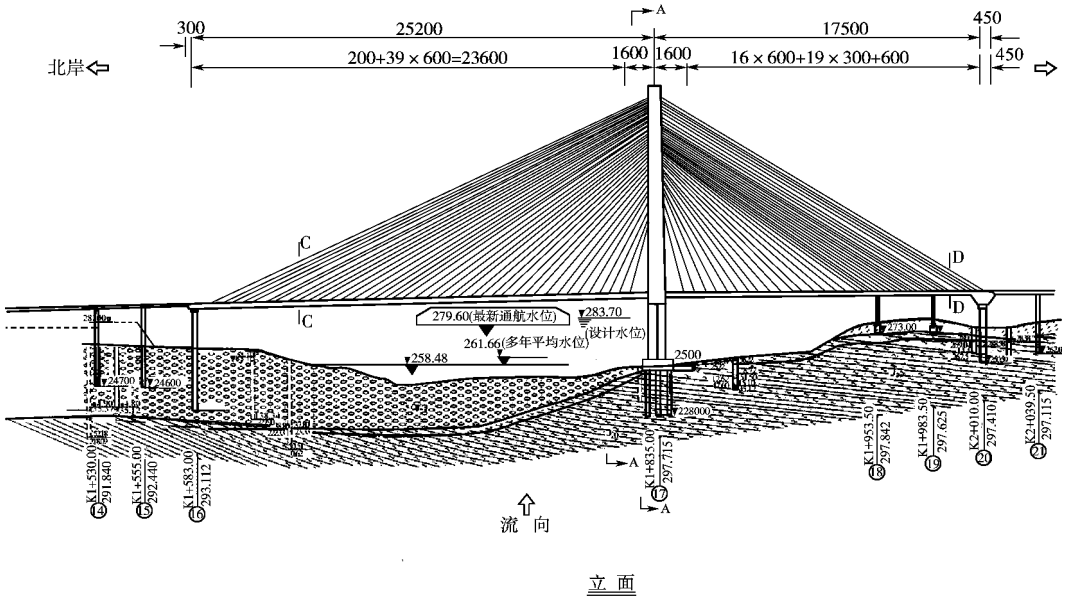


图 1-3-10　某斜拉桥总体布置图(尺寸单位：cm；高程单位：m)

设有两个交界墩，边跨设两个辅助墩，不带协作体系。主梁形式新颖：在双主肋之间加设双小纵肋，其间通过桥面板与横隔梁组合成为正交异性板结构，主梁全宽 30m。大桥结构为双索面、密索、扇形索面，塔、墩固结，主梁悬浮的体系，在索塔下横梁附近设有纵横向限位装置。

斜拉索为环氧喷涂钢绞线斜拉索体系，标准索距 6m，密索段为 3m。索塔共设两道横梁，将整个索塔分为上、中、下塔柱，横梁采用箱形断面，壁厚 1m，上横梁截面高度为 5m，下横梁截面高度为 6m，上、下横梁均设置了水平面内的预应力束。上横梁以上为上塔柱即拉索锚固区段，纵向宽 7m，横向宽 4m，在上塔柱锚固区，采用 U 形预应力束加固，平衡斜拉索水平分力。

主梁采用分离式双主肋截面，并于主肋之间设两道小纵梁，其间通过桥面板与横隔板相互连为整体形成正交异性板。斜拉索锚于主肋上，如图 1-3-11 所示。

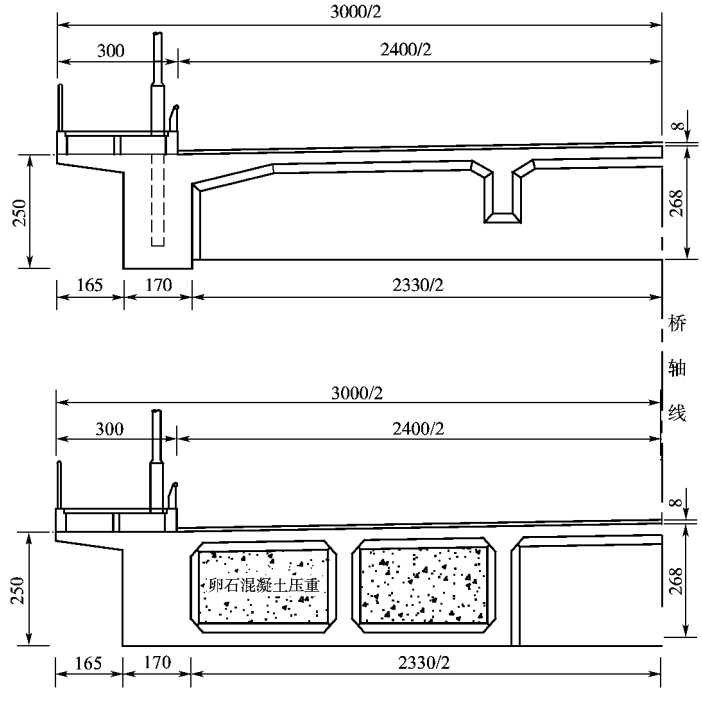


图 1-3-11　主梁 1/2 横断面(尺寸单位：cm)

主桥江心侧主梁共 41 节段，岸侧有 36 个节段，其中江心侧 1 到 39 节段，岸侧的 1 到 16 节段为标准节段，标准索距 6m，质量约 310t 采用挂篮浇筑施工。江心侧 40、41 节段采用搭支架现浇，其中包括跨中合龙段。岸侧合龙段到 36 节段为边跨密索区，索距 3m，节段长 3 m，于每个主肋内侧设单箱单室或双室，箱顶板厚 25cm，低板厚 30cm，腹板厚 40cm，箱内填数量不等的低标号片石混凝土压重，同时于边跨侧尾部设有配重块，边跨密索段采用搭架现浇施工。

(2)主桥主要技术特点

同为跨越能力很强的缆索承重桥梁，与悬索桥相比，斜拉桥有着建设费用较低、无需锚碇等优点。自 1955 年瑞典建成第一座现代斜拉桥 Strömsund 桥以来，斜拉桥建设取得长足发展，仅中国就已建成近 200 座。由于经济等因素的制约，我国斜拉桥多选用 PC 斜拉桥。由于混凝土材料本身的特性给特大跨径的斜拉桥的设计和施工带来较大的困难，该桥也不例外。同已建成的同类型桥梁相比，该桥在设计上的特点有：

①主跨跨度大为 252m，不带协作体系，其跨径在同类型桥梁属于较大者。

②主梁为飘浮体系，带纵横向限位体系，在独塔斜拉桥中较为少见。

③现代 PC 斜拉桥主梁截面常采用双主肋式或分离式双箱结构。这种主梁结构存在截面上的正应力沿宽度不均匀分布的剪力滞效应。本桥主梁设计首次采用一种改进的双主肋结构，即在双主肋之间，设两道小纵梁与横隔梁一起形成正交异性混凝土板结构，用以抑制剪力滞效应，改善主梁受力性能。

④目前斜拉桥拉索常采用两种体系：钢绞线体系和平行钢丝体系。两种体系在国内外均有成功应用的记载，是成熟的技术体系和工艺体系。针对本桥所处特殊地理环境，为提高拉索体系耐久性，同时充分考虑了其他因素，本桥采用环氧喷涂钢绞线拉索体系，其主要特点是索体采用四层防护，即单根钢丝的环氧涂层＋单根钢绞线防护油脂涂层＋单根钢绞线热挤 PE 护套＋整索的 PE 外护套。

⑤本桥采用了 41 对共 162 根斜拉索。斜拉桥的拉索、塔、主梁三者之间相互制约、相互影响，梁、塔的内力及挠度对索力极为敏感，结构体系超静定次数增多给索力的确定与调整带来了一定难度。

(3)主要技术难点

由于新材料和带涂层钢绞线与前支点挂篮配合的使用，给本桥的施工及控制带来了一些技术难点。

①由于环氧喷涂钢绞线属于半成品索，在前支点(牵索式)挂篮施工中必须留有成索空间，这样导致了转换系统的复杂性，如何保证转换系统的可靠性与安全性给前支点挂篮设计带来了较大的难度。

②带涂层钢绞线斜拉索锚具夹片在低应力状态下对钢绞线夹持的可靠性。斜拉索在初张力下可能出现小于 10％控制应力的状态，在这阶段夹片与钢绞线可能会出现相对滑移，从而导致失锚。

③钢绞线斜拉索由多根钢绞线组成，索间存在间隙，导致整根拉索的弦振特征不明显，传统的索力检测方法难于测定索力。另外，单根钢绞线之间索力均匀性控制也是一个难题。

④由于设计上采用预应力混凝土双主肋＋小纵梁截面形式，并且主梁主肋外侧存在宽达 1.65m 的翼缘板，牵索式挂篮设计时应充分考虑主梁这些特点。

⑤本桥主梁的构造形式，其横隔板中顶部容易开裂。

⑥斜拉索的防护是斜拉桥耐久性的关键，所以斜拉索的防护措施，以及营运期间的斜拉索检测就显得特别重要。

(4)挂篮的结构及试验

①挂篮的构造。作为主梁悬浇的主要施工机具，挂篮包括：承重系统、提升锚固及止推系统、定位调整系统、走行系统和模板系统。鉴于钢绞线斜拉索在牵索式挂篮(图 1-3-12)上的使用在国内是第一次，为确保索力张拉与体系转换的安全可靠，根据牵索式挂篮的特点，设计了一套与之配套的索力转换装置。使用效果表明，二者间的相互配合效果满足施工要求。

②挂篮的试验。主要做了两方面的试验：预压试验和主要构件的超张拉试验。

(5)主梁施工过程

①主梁 0 号块现浇段施工

主梁 0 号块全长 20m，主梁主肋在 0 号块处加宽为 2.2m，设有 5 道横隔板。0 号块混凝土方量约为 451m^3，总质量约为 1100t。0 号块件沿桥轴、墩轴线对称布置 2 个横向限位装置

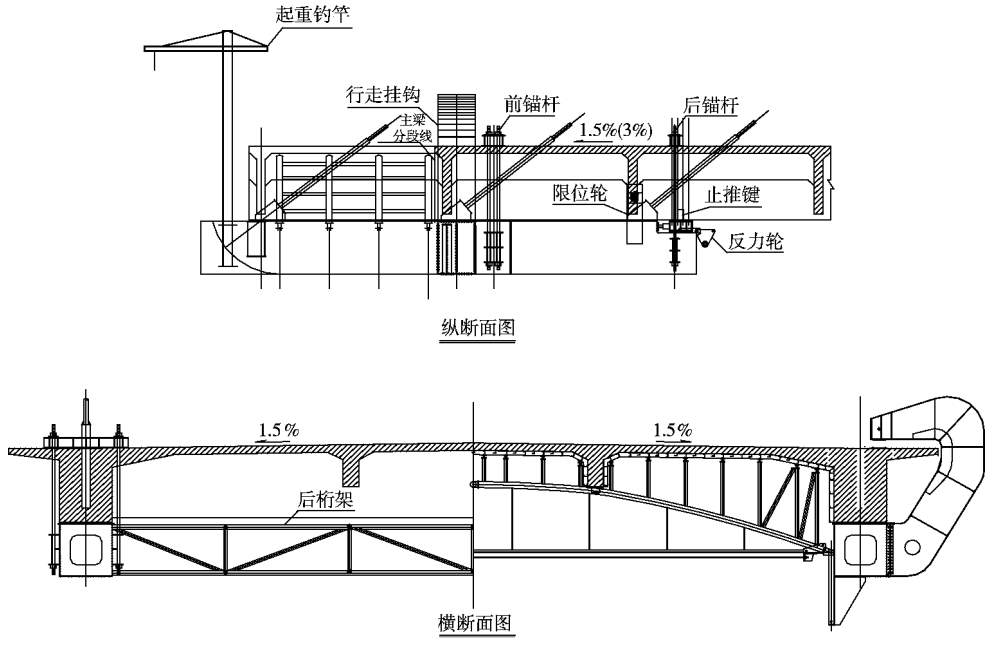


图 1-3-12　牵索式挂篮布置图

和 4 个塔梁临时固结支座，塔梁临时支座在体系转换后成为纵向限位支座。0 号块主要施工步骤如下：

0 号块现浇支架架设、模板、劲性骨架加工、钢筋制作以及其他准备→底模安装、塔梁临时固结支座系统施工→安装构造钢筋、主钢筋、预应力系统→安装内模、外模及横隔板模板→混凝土浇筑、拆模板、混凝土养护→预应力张拉。

0 号块浇筑前将挂篮主纵梁作为 0 号块现浇支架置于其底模下，主纵梁的前端用一组钢绳临时锚固在索塔上以保证浇筑过程结构安全。

②主梁标准节段悬浇

主梁标准节段悬浇流程如下：

牵索式挂篮行走就位→提升内模拱架→调整挂篮初始状态→单根环氧喷涂钢绞挂索→绑扎钢筋及预应力管道安装→第一次整体张拉斜拉索→浇筑本节段一半质量的混凝土→第二次整体张拉斜拉索→本节段混凝土浇筑完成→纵横向预应力张拉→张拉斜拉索，挂篮脱离斜拉索，锚固到主梁上，实现体系转换→第三次整体张拉斜拉索→牵索式挂篮前移就位。

多次重复上述过程完成标准梁段的浇筑。

由于带涂层钢绞线于前支点挂篮配合的施工工艺国内使用较少，通过及时解决施工中出现的新的技术难题，优化施工工艺，在保证施工质量和安全的前提下不断压缩节段施工周期，从刚开始的 15d 一个节段到后来的 6d 一个节段。从而保证了整个大桥的施工工期。

③边跨密索区现浇段施工

该桥中跨为 252m 而边跨为 175m，所以 17 号至 40 号拉索索距为 3m 的密索段，不能进行对称的挂篮施工作业，只能在支架上进行现浇，而且必须在边跨合龙前全部完成，否则将影响中跨标准节段的悬浇。因搭架现浇部分全长71.5m，且现浇支架需要跨越某酒厂的窖池，导致支架系统（包括基础、立柱、万能杆件桁架、型钢分配梁及模板等）十分庞大。密索段主纵肋空箱内要求填低强度等级混凝土，以增加密索段质量，达到配重的目的。A17 至 A36 现浇段总

方量共 1721.821m³，现浇段浇筑次序需考虑支架受载的对称与均衡性，按此原则，现浇段在支架分 5 次隔段浇筑，浇筑前对现浇支架进行全断面压重，这样可以避免因为支架受载不均导致变形过大而引起混凝土开裂。

④主梁合龙段施工

主梁合龙段长均为 3m，合龙段混凝土采用预压换重法施工，即预先在合龙段一端加水箱按合龙段混凝土质量注水压重，随即对合龙段刚性连接施焊(图 1-3-13)，浇筑混凝土时边浇边放水直至合龙段浇筑完成。

图 1-3-13　合龙段刚性连接

⑤斜拉索体系施工

斜拉索采用如 ϕ_j15.24 喷涂环氧钢绞线，标准强度 1860MPa。全桥斜拉索分为 7 种规格：OVM250-22、OVM250-27、OVM250-34、0VM250-37、OVM250-43、OVM250-50、OVM250-55。全桥斜拉索用钢绞线共重 1100t。运到工地的是带单层 PE 单根环氧喷涂钢绞线，为半成品斜拉索。

与斜拉索安装对应的施工步骤如下：

前支点挂篮前移到位→安装斜拉索转换装置→安装 PE 圆管→单根钢绞线挂索、张拉→进行本梁段模板及钢筋施工→对斜拉索进行一次调索→浇筑本梁段混凝土→过程中进行调索以控制高程→混凝土达到 85%强度后再进行一次调索→体系转换，将斜拉索锚固在混凝土梁体上。

按斜拉桥的施工技术标准进行施工控制，工作内容包括：平行钢绞线斜拉索体系制作，配合梁段拼装进行挂索、张拉、锚固、调索、索力转换，外护管安装，两端锚具注浆、注油防腐等。斜拉索制作安装工艺流程如图 1-3-14 所示。

(6)预应力及混凝土工程

主梁预应力体系设置分为横隔板钢绞线预应力束、纵向预应力束、顶板横向预应力束。其中纵向预应力束由精轧螺纹钢和带连接器的钢绞线预应力主索组成。

当混凝土的强度达到 50MPa 时张拉预应力，张拉均采用“双控”原则，按规定的顺序进行。

主梁混凝土的强度等级为 C60，由全自动拌和站生产，泵送到施工部位，每小时产量为 50m³。混凝土的入模遵循先“前端”、后“后端”，先主肋后隔板的原则，同时进行水平分层浇筑。浇筑一半质量时整体张拉斜拉索，然后浇筑剩下的一半。

(7)针对施工特点的技术处理措施

施工前期进行了大量的论证工作和周密的施工组织设计，逐一解决了诸多技术难题，提出了相应的处理措施。

①环氧喷涂钢绞线斜拉索的防松措施

单根钢绞线挂索时，张拉力较小(索应力不超过 $0.15\sigma_b$)，为保证钢绞线与夹片在低应力状态下的锚固可靠性，在单根钢绞线张拉完成后，采用顶压工艺：首先用专用顶压器对钢绞线进行逐根顶压，顶压力控制在控制应力的 30%左右，使得夹片在钢绞线表面只形成一次咬痕；然后利用特制的压板顶压所有的夹片，达到机械自锁的目的，防止滑丝现象的发生。

此外，当挂索完成后，安装夹片防松装置——防松板，用专用扳手将板上各空心螺栓旋紧，

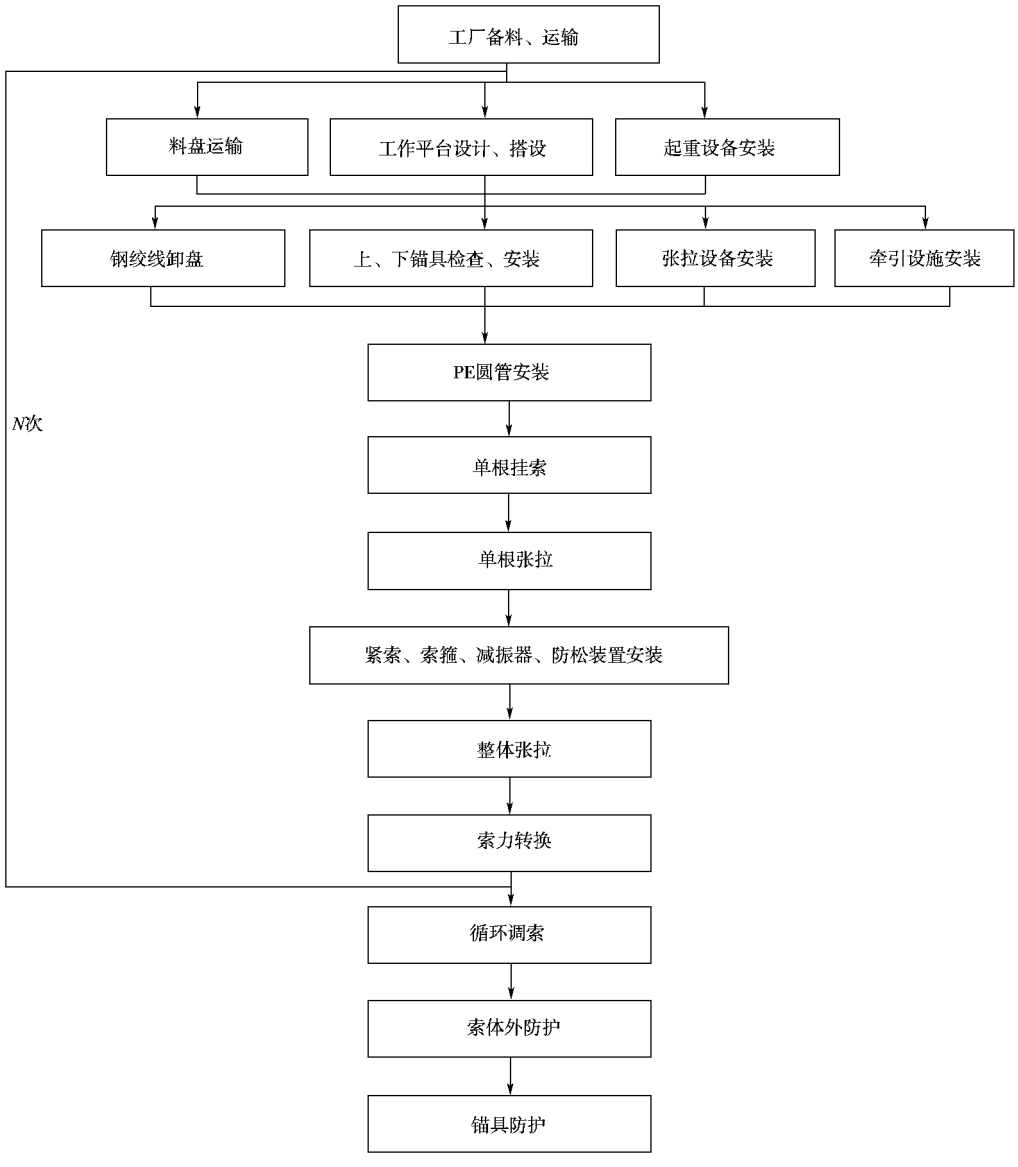


图 1-3-14　斜拉索制作安装工艺流程图

空心螺栓与夹片间垫有四片蝶簧，以随时保持对夹片的压紧力，防止夹片退锚。

②单根索力的均匀性调整

同平行索股斜拉索相比，钢绞线斜拉索虽有安装、运输方便的特点，但它必须在现场单根挂索，而单根钢绞线索力的均匀性控制是钢绞线拉索制作安装的关键，所以单根拉索索力采用振弦式传感器测定。

拉索安装施工中采用等张拉力法平衡单根钢绞线的索力，具体操作方法是：将压力传感器安装在张拉端第 1 根钢绞线上，以后每根钢绞线的张拉力按压力传感器变化情况进行控制，调整张拉千斤顶直至第 2 根钢绞线压力传感器读数与第 1 根相同；将压力传感器移至第 3 根钢绞线，调整张拉千斤顶直至第 3 根钢绞线压力传感器读数与第 1 根相同，重复前述过程直至全部拉索张拉完成。

挂索完成后，即可用大吨位千斤顶进行整体张拉。

同自始至终采用小千斤顶进行单根钢绞线张拉到设计索力的工艺比较，这种方法具有张拉整体性好、效率高的优点。

③转换系统

与成品斜拉索相比，带涂层钢绞线斜拉索在前支点挂篮施工过程中的斜拉索锚固点的转换装置较为复杂，转换系统中必须要有足够的空间让单根钢绞线穿过并成索，要保证这一空间同时保证斜拉索锚固点安全顺利地从挂篮转移到主梁锚固点是该装置设计的难点，也是施工过程中最应关注的位置。

该桥利用特殊设计的转换系统(图 1-3-15)成功地解决了这一难题，几个阶段的施工表明，整个系统工作正常，不仅保证安全可靠，而且不影响施工进度。

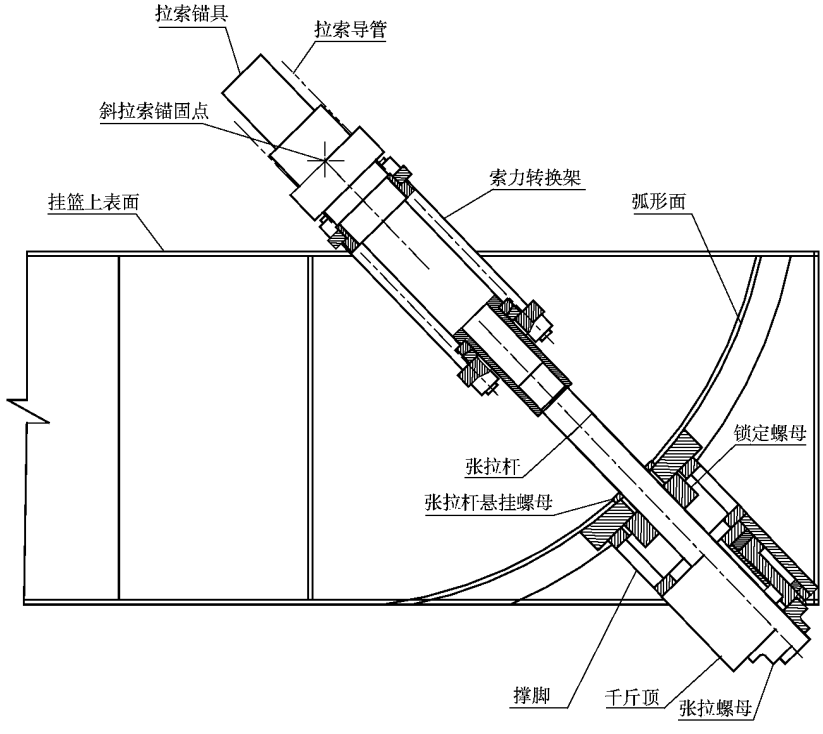


图 1-3-15　索力转换体系布置图

④避免横隔板开裂的措施

国内已经施工过的类似大桥主梁横隔板均不同程度地存在开裂现象。其主要原因是由于在每一个节段内主梁的长度远远小于其宽度，在混凝土强度形成的初期挂篮的刚度制约了横隔板在长度方向的收缩，再加上其他一些原因从而导致混凝土隔板的开裂。该桥在施工过程中从四个方面进行了改进：改善隔板钢筋布置；提前张拉部分隔板预应力钢筋；小纵肋在宽度方向加强了对横隔板的约束；加强混凝土的养护。

⑤斜拉索的防护与营运期斜拉索的健康监测

斜拉索的防护就是要求做到锚具及索体的气密和水密，环氧喷涂钢绞线斜拉索锚具在设计时考虑了这一要求，全部拉索安装完成后在上、下锚具内、外灌注专用的防护油脂。

关于营运期斜拉索的健康监测，该桥在施工过程中安装了压磁式传感器，其在国外使用较早，后来经过国内专家的优化，并且开发了桥梁健康监测的系统，可用于斜拉索索力与索体腐蚀情况的

监测，通过专用的软件和设备可对斜拉索长期的不间断的监测，并可通过多种形式进行报警。

(8)施工控制

斜拉桥的一个特点就是设计和施工高度耦合。施工方法的不同不但影响安装时的结构内力，而且将决定成桥后的桥梁的最终应力状态和几何线形。如何通过施工中的索力和高程的调整来获得设计的应力状态和几何线形，是斜拉桥施工中最关键的问题之一。

本桥施工控制采用自适应控制方法。

为了便于数据的收集、反馈及分析、调整，该桥成立了由业主牵头，由业主、设计、监理、施工及施工监控五方组成的主梁施工督导小组，并明确了各方责任和信息传递过程。该桥在施工控制中主要做了以下几个方面的工作：

①应力控制

斜拉桥主梁主要承受弯矩和轴力，施工过程中对主梁的应力控制要求非常严格，由于本桥的跨径大，在施工监控中采取适当的索力调整措施，将主梁应力控制在安全值内，并确保主梁在巨大的索力轴向分力作用下不出现屈服失稳的现象。

②线形控制

斜拉桥施工过程中严格控制索塔和主梁线形以及主梁的轴线偏位。要求施工监控会同主梁施工督导小组的各单位一起审定施工单位给出的线形观测方案，做好例行测量和安装测量。在控制中充分考虑各种影响因素(如气温、风速、日照以及混凝土的弹模及徐变)，混凝土入模方量的偏差，预应力张拉以及其他原因引起的荷载变化等因素。及时收集和反馈数据，严格按照监控指令执行。

③索力控制

索力控制主要是控制整体索力和单根钢绞线之间的索力均匀性。

④过程控制

建立良好的信息传递过程，使整个施工过程处于受控状态。

2.混凝土边主箱梁斜拉桥短平台悬臂浇筑施工实例

混凝土边主箱梁悬臂浇筑施工与混凝土边主梁的悬臂施工类似，现以武汉长江二桥斜拉桥短平台复合型牵索挂篮的施工为例叙述。

(1)武汉长江二桥概况

该桥主孔为 180＋400＋180(m)飘浮体系双塔双索面预应力混凝土斜拉桥。塔高124.02m，桥宽 29.5m，主梁为两边箱加板式结构，梁高 2.78m。该桥混凝土主梁除塔墩处26.4m长度在支架上浇筑外，自 2(2′)号段开始，混凝土主梁均采用牵索挂篮施工的平衡双悬臂法现浇，一次悬浇节段长度均为 8m。

(2)短平台复合型牵索挂篮构造

短平台复合型牵索挂篮由挂篮平台、三角架和伺服系统(包括牵索系统、悬吊系统、走行系统、锚固系统、水平支承系统、微调定位系统等)三大部分构成。

挂篮平台是牵索挂篮的主体，它由前横梁、后横梁、牵索纵梁、吊杆纵梁、普通纵梁、安全尾梁、水平桁架和纵梁平面联结系组成。前、后横梁为箱形截面的刚性主梁，用平弦式加劲桁加劲后的组合结构。

三角架的结构体系，是刚性的下弦梁用三角式桁架加劲后的组合结构。

牵索系统是施工中作为牵索使用的永久性斜拉索和其梁下锚具以外的其他锚具，利用这些锚具，把牵索与挂篮连接起来，构成牵索传力系统。

(3)短平台复合型牵索挂篮设计

①设计构思

短平台复合型牵索挂篮的设计构思,突破了目前国内外常用的长平台型牵索挂篮的结构形式和施工工艺。为了改进长平台牵索挂篮走行须改变主梁截面设计的问题,在已成主梁上设置三角桁架,采用与普通挂篮走行方式相同的挂篮移动方式,使挂篮平台的后挂钩直接作用于已成主梁上的反力减少到不足长平台反力的一半。依靠三角架,解决了挂篮的走行问题。因此,挂篮平台的长度可缩减到能满足 8m 节段主梁悬浇施工即可,从而大大减轻了挂篮自重,使其总重小于长平台的总重。这就是在长平台牵索挂篮基础上,将挂篮平台减短,增设三角架后,形成的短平台复合型牵索挂篮的设计思路。然而,置于已成主梁下的短挂篮平台的长度甚短,故该平台与已成主梁间的"连接"沿顺桥向的刚度几乎是零,在挂篮和模板等自重下的牵索刚度也不大,因此时索的弹性模量较小,随着节段混凝土量的增加,悬浇节段相对于已成梁的转角亦随之加大,使主梁线形失去了有效的控制。为此在挂篮平台前端,除设有牵索外,同时还设有上端连于三角架的吊杆,并限定前吊杆在施工中始终保持一定拉力,利用三角架较大的刚度,确保混凝土主梁的线形匀顺并符合设计要求。总之,采用短平台,以减轻其自重;安装三角架,以解决挂篮平台的走行;设置前吊杆和牵索,两者共同受力,以控制主梁的线形和应力。

牵索挂篮分两次走行;牵索与挂篮平台间采用弧面承压锚座的连接;模板整体脱模和前移;采用双层挂篮平台结构及一篮多用等的设计构思。

该牵索挂篮的施工荷载传递途径设计为:通过挂篮平台前、后吊杆,将部分荷载传给三角架,再由设于三角架立柱下有前支承座和三角架后端的锚板,直接传给已成主梁的不同横梁上;荷载的另一部分,则由牵索直接传给塔墩;牵索下端的水平力,由牵索纵梁前端传至挂篮平台底层的水平桁杆,再通过抗剪柱传给已成主梁。整个传力途径简捷清楚,直接作用于混凝土主梁上的强大集中力,均布置在抗弯能力大的横梁上,避免了该力落于主梁顶板上而带来的麻烦。

②结构设计

混凝土主梁一个悬臂段施工时,按以下荷载进行本牵索挂篮结构的设计和主梁的应力检算:牵索挂篮自重(包括三角架走道和挂篮走道)237t;三角架后端压重 30t;8m 节段主梁自重 490t;人群及脚手车 16t;模板及其支架等自重 110t;

其他荷载:风管、水管、混凝土泵管、放缆索道 0.25t/m;轮胎吊机重 25t;布料系统重 25t。

结构设计要点。该牵索挂篮系钢结构,规模庞大,承载能力特大。对其主要受力构件,如三角架下弦、挂篮平台的前后横梁和牵索纵梁以及吊杆纵梁、水平桁端斜杆,均采用焊接的箱形截面。施工挂篮的设计,不仅要满足强度的要求,而且要有足够的刚度,以确保梁段浇筑的几何尺寸和梁段衔接的匀顺。因此三角架和挂篮平台应有较强的整体刚度。例如:浇筑混凝土时,在最大前吊杆力作用下的该处三角架挠度(悬臂)比为 1/1800;平台前、后横梁的挠度比为 1/768、1/1972,均小于规范规定的 1/400。

受制造厂和工地起吊设备能力的限制,三角架下弦和牵索纵梁各设拼接一处,前后横梁各设拼接两处。为减少工地拼装工作,拼接板于工厂内电焊于杆件一端,另端设精制螺栓在工地拼接。

三角架各杆件相交处均以销轴连接。安装三角架时,利用设于立柱的小型千斤顶起顶立柱,以消除其轴孔间的非弹性变形。挂篮平台各杆间用普通螺栓连接,以便于工地高空作业。三角架和挂篮平台分两次走行到位。模板及其支架相对固定于挂篮平台上,故挂篮平台走行前,须将其下降 3m。到位后须提升 3m。以此原则设计主体结构及相应的辅助结构。由于短挂篮平台的原因,设计了抗剪柱以传递索产生的水平力。

挂篮前吊杆、后吊杆和抗剪柱，均以简支（两点支承）的形式布置在主梁的横断面方向上，使之受力明确，并适当考虑受力不均的影响。

该牵索挂篮按三种用途进行设计：即除了主要用于混凝土主梁 8m 节段一次悬浇施工外，还用于主梁边跨和中跨合龙段施工，以及主梁合龙后的主梁纵向预应力筋的张拉施工和主梁梁体的修饰及其他施工工作。

结构所用钢材的容许应力取值，是按《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60—2004）规定的容许应力再提高 10%作为设计用值的。考虑本结构系为多次重复使用的临时结构，且设计荷载绝大部分是永久荷载（恒载），所以容许应力的提高系数定为 1.1。

③混凝土横梁应力的理论计算与模型试验

主梁节段混凝土浇筑完毕牵索未张拉前，三角架前支承直接作用于混凝土横梁上的竖向荷载为最大，无论是一次浇筑 4m 的普通篮，还是一次浇筑 8m 的牵索挂篮，均应各自以此荷载进行横梁应力的验算。

沿梁的纵向，切取包括七根横梁在内的 24m 长的主梁，按空间梁格体系，用三维梁单元考虑主梁纵横桥向的实际刚度，假定横梁两端各斜拉索连接点为弹性支承点，弹性支点的刚度系数按斜索的长度、面积和倾角换算而得，用 SAP5 程序进行分析计算。计算结果：设考虑分配后的横梁最大弯矩为 M_1，未考虑分配（即按简支梁计算）为 M_2，则 $M_1/M_2=0.291$，亦即，横梁按简支梁计算时，实际作用于横梁荷载的 29.1%分配于该横梁，其余 70.9%的荷载分配到其后的六根横梁上。在 1/100 斜拉桥整体模型上，作了横梁应力测试试验，结果为 23%和 77%，与理论计算相近。

（4）挂篮制造与拼装

该牵索挂篮全部为钢结构。除一部分机加工构件外，大部分是焊接构件，而焊接构件又以箱形截面居多。虽然该挂篮是施工临时结构，但是，由于使用时间较长、重复使用次数多，是承受荷载大的高空结构等原因，所以采用了与永久结构同样严格的制造标准。挂篮构件制造完毕后，在工厂按三角架和挂篮两个独立单元进行试拼装。走行小车组拼后，并在三角架下弦轨道上试运行。

（5）加载试验

牵索挂篮在正式投入使用之前，必须作加载试验，以验证挂篮结构本身的强度和刚度是否达到设计要求，同时还要验证各主要施工工序和工艺要点的具体操作和结果是否达到设计预想的结果。

（6）主梁节段主要施工步骤

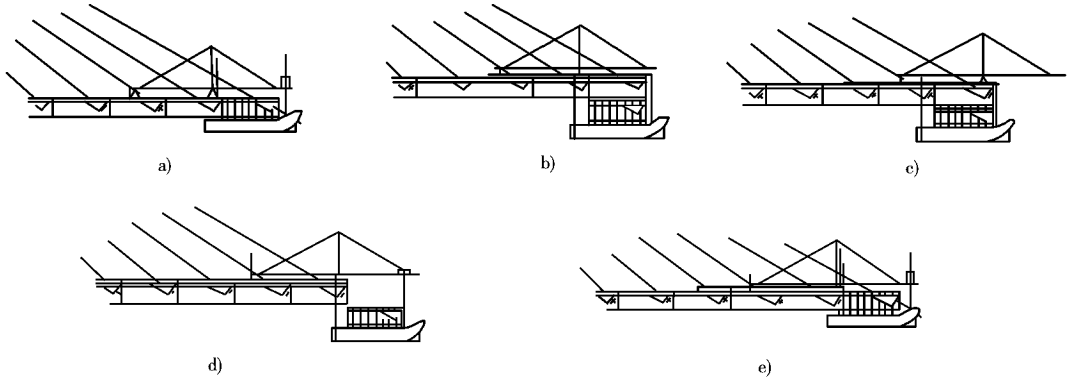


图 1-3-16　短平台复合型牵索挂篮悬浇主梁节段施工的主要步骤
a）8m 节段主梁混凝土浇筑完毕；b）挂篮下降 8m；c）三角架走行 8m；d）挂篮走行 8m，到位后提升 8m；e）三角架与挂篮再次对位结合灌注 8m 节段主梁混凝土

如图 1-3-16 所示，主梁节段施工中，在挂篮前吊杆和牵索共同作用条件，必须保证前吊杆受拉力，而且该拉力值必须是在设计所规定的范围内变动。为此装置了前吊杆杆力的测力计和显示器，以使按设计要求指导牵索索力的调整。这是主梁节段施工的最主要的工艺要求。

第三节　斜拉桥混凝土主梁的悬臂拼装施工

斜拉桥混凝土主梁的悬臂拼装在国内外已有多座桥的施工实例。以下以湖北郧阳汉江斜拉桥箱形主梁悬臂拼装施工为例介绍。

一、桥 梁 概 况

该桥为 84＋414＋84(m)三跨预应力混凝土斜拉桥，主孔一跨跨越汉江，两个倒 Y 形桥塔高 90.42m，均设于岸上。边孔与主孔比仅为 0.203，为了克服边孔太小，两端均设置重力式平衡桥台，将岸跨的绝大部分斜拉索以地锚的方式锚固于重力式平衡台上。主跨 414m 的跨中设有无轴力连续钢箱梁，在结构中能作纵向活动，不传递轴向力，但可以承受纵、横双向的弯矩及剪力。该桥于 1991 年开工，1994 年建成通车。

主梁用两种方法施工。两边跨和主跨岸坡段长 158.8m(郧县岸 71.4m，十堰岸 87.4m)，采用支架现浇施工；主跨河心部分长 341.2m，分 88 个节段预制，最重梁段 105t，由驳船运至桥下用三角形吊机吊装就位。全桥设置 8 道湿接缝，以调整悬拼施工跨距误差。

二、主梁边跨和岸坡段现浇段施工

实施方案由桥塔横梁处起步，分别向河心和岸侧对称浇筑主梁。首先在桥横梁上浇筑 0 号块，接着在两侧支架上浇筑两侧 1 号块后将桥塔与主梁上的限位块加临时锚筋浇筑混凝土，使塔梁临时固结；向河心和岸侧每浇筑两段主梁，安装一次斜拉索，由斜拉索承受已成主梁的重力。每安装两组斜拉索，拆除门形支架后支腿到前端拼接成新门架，继续现浇主梁混凝土。已成梁段只需支架支承从浇筑混凝土至斜拉索安装完成的 12d 时间，避免了地基不均匀沉陷的影响。

1. 支架预压

现浇支架拼装完成后，用 1.2 倍施工荷载进行一次压载试验，测出地基及支架每节间的平均下沉值。安装模板时根据支架的不同高度设置施工预拱度，预拱度值为 0.9～1.8cm，在混凝土浇筑过程中，观测模板高程及轴线变化情况并加以校核，有效地实现了对现浇主梁线形的控制。

2. 边跨主梁与锚固桥台的合龙段施工方法

拆除主梁与桥塔在限位块处的临时固结混凝土，使主梁悬浮，在主梁与锚固桥台之间焊接临时“体外刚构”，将主梁与锚固桥台固结，实现由塔梁固结到锚台与主梁固结结构的体系转换，再浇筑合龙段混凝土。

3. 主梁纵向预应力束

选用 24ϕ5mm 高强钢丝，用墩头锚及连接器分段锚固、连续接长、纵向贯通。由索塔横梁处起步向两侧对称现浇主梁的施工方法，提供了两个同时施工的工作面，较由锚固桥台向河心单侧现浇主梁的施工方法提前工期 2 个月，减少了大量施工设备的投入，有效地实现了主梁线形的控制，避免了混凝土产生裂纹，主梁施工质量优良。

三、主 梁 预 制

预制主梁共 341.2m，标准节段共 76 块长 304m，无拉索梁段每块长 4.3m，有拉索梁段每

块 3.7m，跨中合龙变化段 12 块，长 37.2m。共有 7 种不同规格的预制主梁段。主梁端面设有榫槽，要求连续啮合预制，以保证悬拼时榫槽啮合，满足拼装精度要求。主梁如图 1-3-17 所示。

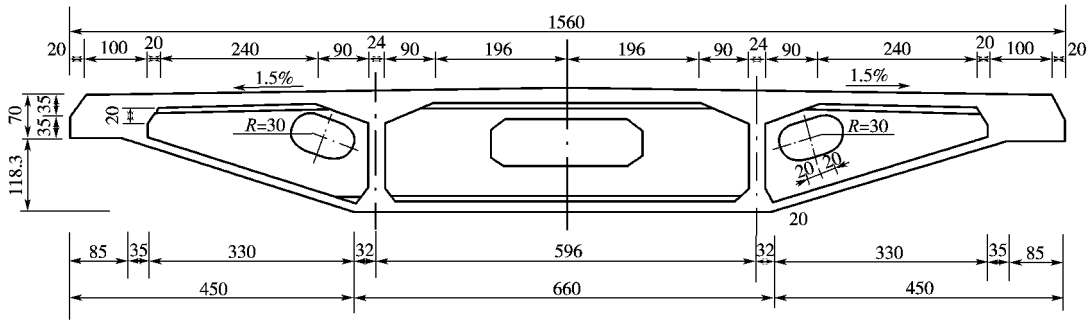


图 1-3-17　郧阳斜拉桥主梁截面(尺寸单位：cm)

预制块选在十堰岸桥位下游 100m 河岸上。预制场总长 110m，宽 26m，占地 3000m²，采用 43m 半长线台座，可连续啮合预制 8 块主梁。梁预制台座最后端的主梁移到起始端，用上一块主梁的前端面作为下一块主梁的后端模板，从而实现了连续啮合预制施工的目的。在台座上间隔 8m，同时按顺序预制两岸主梁。

预制模板采用工地加工的大钢模，具有足够的刚度。主梁混凝土一次浇筑成型，施工精度和质量完全满足设计要求。待主梁混凝土养护至标准强度的 75%后，施加竖向预应力和顶、底(腹)板横向预应力，并用龙门吊机移运到称重台上精确称量，预制质量误差不超过 1t，再运到主梁存梁区静置 3 个月，以减少主梁悬拼时混凝土收缩徐变的不利影响。存梁场长 65m，按 3 层置放，可容纳 45 块梁段。

四、主梁悬拼段施工

1. 预制梁段运输

在十堰岸预制场临河岸壁陡峭处建立一座钢栈桥式码头，其构造如图 1-3-18 所示。存梁场的预制主梁通过转向运输轨道运至钢栈桥处起吊装船，再运送到桥位下起吊悬拼。两岸同时对称施工。

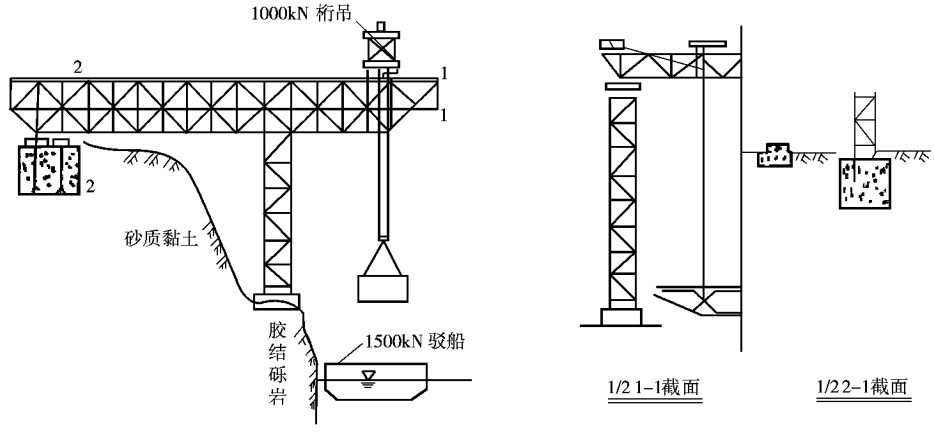


图 1-3-18　运送预制梁段钢栈桥码头示意图

2. 悬拼吊机方案的确定

单箱三室主梁高跨比为 1/207，为超轻 PC 梁，设计要求悬拼施工荷载不超过 200kN。为此，主梁悬拼施工方案历经了几次变更。投标时为缆索吊机悬拼主梁方案，开工后又拟用长导梁悬臂吊机悬拼主梁方案。最后主梁悬拼经过方案比选采用了三角吊机方案。该吊机成本低廉、构造简单，自重轻、结构强度高，稳定性好、工作方便，悬吊荷载时支座处的水平推力和压力都较小。

3. 三角吊机的结构与安装

三角吊机由承力框架、起吊系统、变幅锚固系统、支座、走行系统等组成。其构造见图 1-3-19所示。

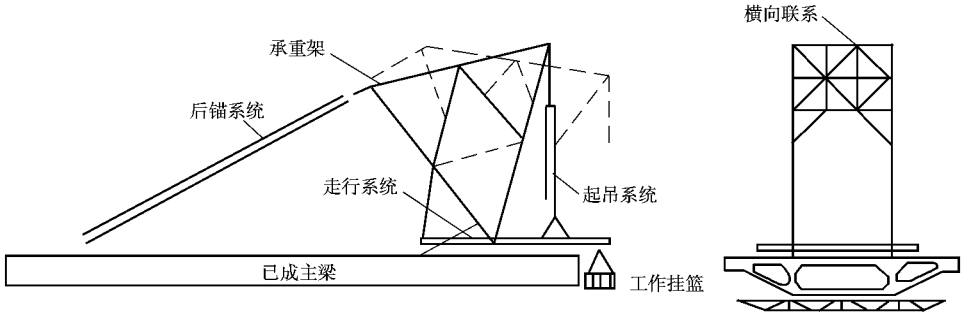


图 1-3-19　三角形吊机悬拼主梁施工示意图

三角吊机的全部构件在工地加工完成，用 4 组 5t 的跨河缆索吊机安装。用缆索吊机吊起单排三角形承重架(重约 6t)装入焊有支座的钢走板就位，插入钢销和主梁锚固，再拼装横联桁架形成承重框架，安装三角形后撑架及后锚变幅滑车组，吊机即可独立稳定，最后安装起吊滑车组系统和其他配件。在工地加工一套三角吊机需 15～20d，安装时间 5～7d。

4. 悬拼施工工艺

悬拼两块主梁并安装完成一组 4 根斜拉索后，向前移动一次吊机；每前移四次吊机，后锚变幅及起吊卷扬机组前移一次。主梁从江面起吊至悬拼就位约需 1h，前移一次约需 2h。三角形吊机重 20t(25t 和 2 台 8t 后锚变幅、起吊卷扬机布置在吊机支点 40m 以后，不计入梁端施工荷载)，满足设计对施工荷载的严格要求，优化了主梁悬拼施工程序，使主梁悬拼安装的施工精度和安全得到保证。起吊 100t 主梁时，实测吊机主要受力前杆正压应力仅为容许应力的 4%，起重潜力很大。两岸各布置一台吊机同时对称悬拼主梁，平均 7～8d 可悬拼 4 块主梁、安装 2 组斜拉索，较原缆索吊机方案悬拼主梁提前工期近 4 个月。其悬臂拼装如图 1-3-20 所示。

图 1-3-20　郧阳斜拉桥主梁悬臂拼装

第四节　斜拉桥钢主梁悬臂拼装施工

一、斜拉桥钢结合梁悬拼施工

以下以上海杨浦大桥施工为例介绍。

1. 主桥概况

杨浦大桥主桥为双塔双索面全漂浮体系结合梁斜拉桥，桥面宽 30.35m，为六车道及两侧各 2m 的观光人行道。横梁长 22.7m，宽 0.6m，中部高 1.95m，端部高 2.7m。横梁每隔 4～5m 一根，共 245 根，每根重 15～17t。小纵梁每段两根，共 488 根。人行道挑梁共 248 根。全桥钢结构总质量 12600t，梁与梁之间用 M30、M22 高强度螺栓连接，共约 344000 套。大桥中孔主跨 602m，是当时世界上跨度最大的斜拉桥。主桥桥面采用钢梁与混凝土桥面板相结合共同受力的结合梁结构。主梁为双肢结构的钢梁形式。如图 1-3-21 所示。

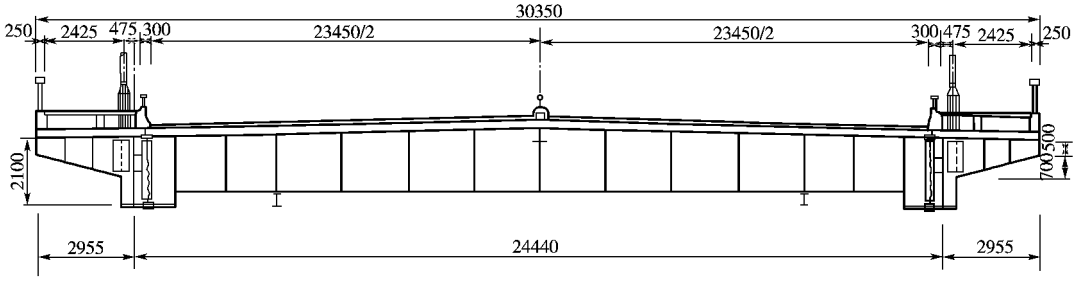


图 1-3-21　主梁一般横断面图(尺寸单位：mm)

受桥面安装吊机回转半径的限制，钢梁分段长度在 9m 左右。具体为：0 号段为 3 个 13.5m 节段，河跨每侧为 30 个 9m 节段，第 31 号段长 8m，合龙段长 5.5m。岸跨为 23 个 9m 节段，尾段分两段安装，总长 22.75m。整个主桥(不包括过渡孔)共 119 个节段。主钢梁宽 2.3m，高 2.7m，标准长 9m，单段梁重 35t。13.5m 的 0 号段质量 60t，9m 辅助墩墩顶段质量 40t，22.75m尾段质量 180t。

桥面板横向分三块，0 号～6 号段厚 40cm，7 号～10 号段厚 40～26cm，11 号段以后为 26cm。每块桥面板质量在 30t 之内，混凝土强度等级 C60。

大桥每座主塔两侧各有 32 对斜拉索，全桥共 256 根。最长索 325m，质量约 33t，索面为三维空间体系，张拉端设在塔内。索在桥面上的间距为 9m，在塔上间距为 1.75m，全桥斜拉索总重约 2900t。

2. 钢主梁悬拼施工工艺

(1)0 号段施工工艺

0 号段安装是整个主桥安装的基础和关键，其安装质量直接影响全桥，安装后的轴线和高程必须与设计要求一致。此外，为克服主桥安装过程中产生的倾覆力矩和剪力，必须将 0 号段钢梁临时固结。为此，安装 0 号段前必须先加工临时固结装置并安装到位。根据计算，主桥临时固结装置必须承受 27000kN·m 的倾覆力矩及 1000kN 的剪力。临时固结体系采用钢结构，分为两部分：下部采用 4609mm 的钢管，上下游各 4 根，其间距顺桥向为 4.5m，横桥向为

1.5m，安装时将钢管直接和塔柱下横梁上的预埋件焊接上；上部为钢肋板、加工时即将其焊在0号段中间一段的钢梁下。安装时对其加工精度进行了复测，并将误差在下部钢管开槽时调整。当确认轴线和高程无误后，即进行焊接，使钢梁与临时固结之间形成刚性连接。采用钢结构临时固结装置的最大优点是施工简便，能最大限度地满足轴线、高程的精度要求，并能在全桥合龙后以最快速度加以解除，实现受力体系的转换，保证塔柱和桥面温度变化情况下的安全。

0号段总长为40.5m，由三个13.5m节段组成。施工时先吊装中间节段，采用卷扬机加索具的方法，将定滑轮安装在主塔121m高程处的进入孔上，由地面20t卷扬机通过滑轮组将钢梁直接从地面起吊。为防钢梁与主塔横梁碰撞，地面另设两台50t卷扬机作留缆。当钢梁起吊高度超过主塔横梁时，将原先与横轴线平行的钢梁转90°。使之与纵轴线平行，进而由横梁上的卷扬机将钢梁移至临时固结装置上，慢慢放下使临时固结装置的上部肋板插到下部钢管桁架上的槽底。测得钢梁轴线和高程与设计要求一致时，即将临时固结装置的上部和下部焊接。用相同的方法安装另一根主梁和三根横梁。

待框梁形成后，即安装0号索，然后利用原有的起吊设备安装桥面板。河跨另一个0号节段采用65t的扒杆安装。扒杆安装在已完成的中间节段上，为加快进度，岸跨另一个0号节段由200t吊车安装。

(2)1号段施工工艺

为使1号段主梁安装时在0号段处不发生过大弯矩，必须在河跨、岸跨两个0号段上设置临时接索，其索力控制在3000kN左右。为此，在中间一个0号段上安装了一个临时索塔，塔高8m，上部设有索鞍和千斤顶。操作千斤顶使索力达到设计要求。由于0号段长度不能满足用于安装标准段的桥面吊机拼装场的要求，所以按河、岸跨两个0号段相同的工艺进行1号段的安装。

梁与梁之间采用摩擦型高强度螺栓连接，它必须满足两个条件，即具有足够摩擦系数的摩擦面及摩擦面间具有足够的正压力。因此，梁与梁之间的连接板均需进行摩擦面处理，其摩擦系数须大于0.45。高强度螺栓采用扭矩法施拧，使用前要根据不同的出厂批号进行扭矩复验，其值在0.11～0.15为合格。然后根据设计轴力确定不同的施工扭矩。

(3)标准段施工工艺

系指采用同一施工工艺的河跨2号～31号段、岸跨2号～22号段的安装。标准段钢梁由特制的桥面吊机安装。桥面吊机由底座、机身和扒杆组成，扒杆长28m，最大起重量35t，最大回转半径8.5m，吊机自重120t，桥面吊机在现场由安装在0号段上的扒杆拼装。

钢梁安装时，构件由加工厂用汽车或船只运至工地，由安装在地面上的400kN门吊和小平车将其运支架在主塔一侧由万能杆件拼装而成的垂直起吊处，由垂直提升到桥面经过改制的罗曼车上，运至安装所需位置，然后由桥面吊机安装就位。一节钢梁的安装顺序为：主梁安装→横梁安装→小纵梁安装→检修行车轨道安装→人行道挑梁安装→斜拉索安装→桥面板安装→调整索力→桥面吊机前移一个节段→按上述顺序安装下一节段→浇筑桥面接缝混凝土→施工安全平台随节段的延伸可以同步前移。主梁标准节段施工如图1-3-22所示。

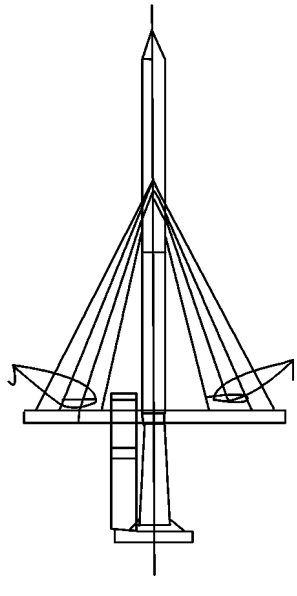


图1-3-22　主梁标准节段施工示意

(4)尾段施工工艺

由于主桥河岸跨长度不对称，岸跨比河跨短 58m，而斜拉索同样有 31 对，岸跨 25 号～31 号斜拉索均锚固在尾端钢梁的端部，因此，尾端钢梁为特殊形式的梁，其长 22.75m，高 7 m，宽 2.3 m，重 180 t。为便于安装，制作时将尾段钢梁垂直分为两段，即 24 号段、25 号段，每段重 90 t。尾段框架除一般的钢横梁外，在端部上下游主梁间设有一根截面为 7 m×4.5 m 的钢筋混凝土横梁，以增加尾段框架的自重力和满足过渡孔梁安装的需要。

尾段由 300t 吊车安装。安装前先在 24 号段端部做临时支墩，用吊车将 25 号段钢梁安装就位并临时固定后，再将 24 号段吊装就位，使之一端搁在临时支墩上，另一端用高强度螺栓和 25 号段连接，再安装钢横梁并施工钢筋混凝土端横梁。

3. 斜拉索施工工艺

为方便运输和安装，斜拉索出厂前盘绕在特制的索盘上，水运至工地后，由地面水平和垂直运输设备将其运到桥面，再由桥面吊机将索盘搁在特制的放索架上。施工时由安装在桥面上的 80～200kN 卷扬机通过塔顶上索具及滑轮组将斜拉索缓缓抽出，然后用桥面吊机将锚固端锚具在钢主梁中安装就位。此时塔顶上的滑轮组继续将斜拉索牵引，当张拉端锚头接近塔柱上的安装索孔时，就将其和张拉千斤顶上伸出的钢绞线连接，开动塔内张拉用 6000kN 千斤顶将索牵引至所需位置，然后套上固定螺帽。斜拉索安装就位后，即可按设计指令张拉。

4. 合龙段施工工艺

全桥共三个合龙段，即两个边跨合龙段和一个跨中合龙段。

(1)边跨合龙

采用强制合龙工艺。施工时，先在合龙位置上预留出大于合龙段钢梁实际长度的距离。先在合龙段的 23 号框架，然后用两台事先安装在锚固墩上的 1500kN 千斤顶利用尾段钢梁下的球形盆式橡胶支座的可移性，同时将总质量达 3000t 的尾段钢梁框架及端横梁向已安装好的 23 号段顶进，实现尾端与 23 号钢梁的合龙。此工艺可避免因季节、昼夜温度变化使钢梁胀缩带来的确定合龙段钢梁尺寸的困难，并可根据现场施工进度等条件适时选择合龙时间，缺点是技术要求高，必须配置专门设备，并要对受力情况作详细的计算分析。

(2)跨中合龙

采用降温式自然合龙，其过程是预先设定一个合龙温度，然后根据各种边界条件计算该温度下合龙段钢梁的加工长度。准备工作就绪后，当气温上升或降低到预先设定的温度时，即将钢梁安装就位。因此，准确确定合龙温度及合龙段钢梁的加工长度是合龙成功的关键。

根据主桥的安装总进度，跨中合龙时间定于 1993 年 4 月 8 日。根据气象台提供的 1973 年至 1992 年 20 年间 4 月上中旬的气象资料和对本年度 4 月 8 日的温度预测，最终确定合龙温度为 12℃。

为了保证准确合龙，还必须确定 12℃下的合龙段钢梁的加工长度。此长度与钢梁的总体压缩变形、加工及安装的误差积累等因素有关，必须一一加以修正。根据对跨中 26 号、28 号、30 号段安装完后的三次 24h 连续观测，并综合分析计算各因素后，确定的合龙段最后长度上游为 5.52m，下游 5.536m。为保证跨中合龙一次成功，4 月 7 日下午进行了试吊，并精确调整了浦东、浦西两侧高程和轴线。

4 月 8 日上午 8:48，跨中合龙段钢梁正式安装，两台桥面吊机同时将上下游各一根主梁起吊就位。浦东一侧按常规对高强度螺栓初拧。受北方冷空气的影响，桥面温度一直在 10℃，此时将下游一侧钢梁栓孔对齐，12:25 将上游钢梁栓孔对齐，施工人员迅速将定销和高强度螺

栓插进栓孔。与此同时，开始解除浦西的临时固结。13：00 上下游两根主梁的高强度螺栓全部到位并开始初拧，13：20 临时固结解除，15：45 合龙段高强度螺栓全部施拧结束。

二、斜拉桥箱形钢主梁悬臂拼装施工

1. 概述

斜拉桥钢箱梁一般在工厂分节段加工制作并预拼装，然后运至现场吊装就位，节段长以布置 1～2 根斜拉索为宜。斜拉桥钢箱主梁的悬臂拼装与本章第四节的预应力混凝土斜拉桥主梁悬臂拼装施工方法基本相同，常用的起重设备有悬臂吊机、缆索吊机、大型浮吊、千斤顶等。

2. 斜拉桥钢主梁悬臂拼装法施工关键技术

(1)斜拉桥钢主梁节段连接技术

斜拉桥钢主梁块段之间连接的接头往往会成为结构的薄弱点，其质量可靠与否直接关系到钢主梁斜拉桥施工的成败，是斜拉桥钢主梁悬臂拼装施工的关键技术，一般分为全断面焊接连接和全断面高强螺栓连接两种。

①全断面焊接

由于一般钢箱梁的底板和顶板纵向及横向焊缝施焊时接近水平状态，故采用自动焊接，即：陶瓷衬垫＋药芯焊丝，二氧化碳气体保护焊打底＋埋弧自动焊盖面的单面焊双面成型的焊接工艺。对于纵肋等其他部位的焊缝，根据情况可采用手工焊接或二氧化碳气体保护焊。但在同一条焊缝上不允许两种工艺混用。在拼装过程中，要求每 5 条横向受力对接焊缝要设一对生产试验板，其他焊缝每 10 条焊缝设一对生产试验板，并且执行严格的无损探伤检测要求。

对于焊缝内部出现的气孔、夹渣等缺陷，一般认为是板块焊接时空气湿度较大，风也较大，从而导致气孔；而夹渣的原因一般是焊层与焊层之间的杂物没有清除干净，同时施焊人员对质量不够重视。

针对上述影响焊缝质量的因素，可以制作风雨棚，风雨天气焊工在棚内作业，施焊前要用火焰烘烤焊缝区域，直到没有水汽方允许施焊。天气晴朗时，可以不用风雨棚，但早上在施焊前同样要烘烤焊缝区域。为预防产生夹渣，可采取在焊缝内及其两侧各 50mm 范围内用砂轮机打磨，把铁锈清除干净的措施。在第一层二氧化碳保护焊后，去除药渣，再打磨焊缝，最后用毛刷将杂物清除干净后方允许施焊。在埋弧自动焊盖面前，同样要对焊接区按上述要求进行清洁工作。在质量管理上可采取的措施是绝对禁止无证焊工上岗，焊接检验员随班巡视，对焊接工艺进行全方位监督。

②高强度螺栓连接

高强度螺栓连接的原理就是利用涂有摩擦层的拼接板和梁段接头通过高强度螺栓拉紧产生的摩擦力来实现传力的。由于其通过接头以一定的面积传力，故传力较均匀、无突变，且高强度螺栓的施拧质量可控性较强，因而比较广泛地运用于钢桥的连接。

高强度螺栓的运输：高强度螺栓出厂运输应有专门的包装，以防止在运输过程中的碰伤和污染等。运至工地后，应进行使用前的检查，并清洗油污，再在其螺纹上涂以少许黄油，然后在螺栓头上用油漆注明长度，将螺母、垫圈等成副装箱备用。

高强度螺栓的工地试验及施拧控制数据的确定：用扭矩法施工时，根据选用的施拧工具进行螺栓扭矩系数试验，求出数理统计值作为施拧依据，如离散性过大，应认真研究采取措施。

用扭角法施工时，确定初拧预拉力后，按板束厚度或层数，经过试验测定螺栓轴力与相应转角之间的关系，作为施拧依据。

用扭矩法施拧高强螺栓时，必须分两次（初拧和终拧）拧紧。初拧扭矩应由试验测定，一般为终拧值的30%～70%，终拧扭矩值按下式计算：

$$M=k\cdot N\cdot d$$

式中：M——终拧扭矩值，N·m；

N——螺栓的施工预拉力（设计预拉力的1.1倍），kN；

k——扭矩系数（按试验数理统计值）；

d——螺栓公称直径，mm。

用扭角法施拧高强螺栓必须分两次拧紧，第一次用扭矩法初拧使板束达到密贴程度，然后在螺栓和螺母相对位置划一直线；第二次按照试验的相应转角终拧，控制螺母转角。

高强螺栓的施拧工具：施拧高强螺栓的扳手可以使用带扭矩计（或带响、亮灯的定值静力矩）的风动、电动或手动扳手。若采用自动控制高强螺栓应力的扳手（高强螺栓受力达到施工预拉力后，能自动断电，扳手停止转动），则可使用一次施拧法。但此种扳手必须先经过试验标定。无论采用何种扳手，均应于每班工作开始前经过试验标定。

高强螺栓的施拧工艺：为保证连接处的几何尺寸的精度，应先用冲钉固定板束位置，其余孔眼均应穿上高强螺栓。初步夹紧板束时，在先穿的螺栓终拧后，再用螺栓换下冲钉。所用冲钉数目应按计算确定，但不得小于孔眼总数的一半，其余孔眼布置高强螺栓。施拧螺栓的顺序应从板束刚度大、缝隙大的地方开始；对大面积节点板应由中央以辐射形式向四周边缘参差地进行，最后拧紧四周端部螺栓。高强螺栓施拧完毕，应按下述规定进行检查：设专人检查，当天拧好的螺栓当天检查完，并将检查结果作出完成记录。

每一螺栓群检查的数量为其总数的5%，采用螺母退扣检查时，刚刚转动的扭矩值、超拧值或欠拧值均不得大于规定值的10%为合格；每个节点抽检的螺栓，其不合格者不得超过抽检总数的20%，否则应继续抽查直至累计总数80%的合格率为止，然后对欠拧者补拧，对超拧者进行更换。

高强螺栓的施工注意事项：高强螺栓应顺畅穿入孔内，不得强行敲入，穿入方向全桥应一致，以便操作和养护检查；安装高强螺栓时，杆件的摩擦面应保持干燥，不得在雨中作业；采用扭矩法终拧时，对多层板束应防止欠拧；对层数少的板束应防止超拧，并防止漏拧。施拧螺栓时，不得采用冲击拧紧、间断拧紧；被栓合板束的表面应垂直于螺栓轴线，否则应在螺栓垫圈下面加垫斜坡垫板，以免高强螺栓受到偏心拉力。

（2）合龙段施工

合龙段施工关系到结构内力是否合理分配以及桥面是否平顺；不合理的合龙甚至会影响结构的安全。所以，应对钢梁的合龙给予高度重视。钢梁的合龙常用的是自然合龙和强制合龙。

强制合龙一般用于边跨合龙，它是在合龙段位置上事先留出稍大于合龙段钢梁的距离，先行吊装合龙段，然后用千斤顶将尾段钢梁向已安装好的合龙段顶进，最终采用这一工艺，可以避免产生因季节、昼夜温度变化使钢梁涨缩带来的确定合龙段钢梁尺寸的困难，并且可根据现场施工进度等条件适时选择合龙时间。但必须进行计算分析和专门设计。

自然合龙又称降温合龙，即先设定一个合龙的温度，然后根据各种边界条件计算此温度下的合龙段钢梁加工长度，施工时，当准备工作就绪后，待大气温度上升或降低到预先设定的要求时，即将钢梁安装就位。自然合龙成功的关键是合龙温度和合龙段钢梁长度的确定，合龙温度应选在气温变化较稳定的阴天或夜晚，并要在温度再次出现急剧变化前留有足够时间以完成主梁间节点的连接和梁塔临时固结装置的解除。

3. 斜拉桥钢主梁悬臂拼装法施工要点

斜拉桥钢主梁悬臂拼装施工可采用悬臂吊机、缆索吊机、大型浮吊、千斤顶及各种自制吊机等多种设备实施。施工时应结合设计要求，施工现场环境条件确定。

(1)0 号块的安装

0 号块的吊装分为水上吊装梁段和陆地吊装梁段。水上吊装梁段一般采用大吨位浮吊吊装，陆地吊装梁段采用其他大吨位吊机吊装。

由于 0 号块梁段无斜拉索支承，所以一般用钢管排架作为临时支撑，如图 1-3-23 所示。0 号块梁段起吊到位后，利用支架上设置的滑道、临时调节支座，水平移动平车及千斤顶顶推装置将梁段平移就位。

(2)标准节段的安装

斜拉桥标准节段的安装一般采用步履式悬臂吊机对称进行，如图 1-3-24 所示。在首节标准段安装时，由于一般在 0 号块上不可能同时安装 2 台步履式悬臂吊机，往往采取先安装一侧步履式悬臂吊机，吊装一侧的一节标准梁段，同时为了保持梁体平衡稳定，在 0 号块的另一侧配置平衡重抵抗倾覆力矩。从第二节标准梁段开始，即可撤去平衡配重，实现平衡悬臂吊装施工。在悬臂吊装施工时，吊机的后端通过焊接在箱梁顶面的耳环，以销轴连接提供稳定力矩。而梁段的运输在深水区一般采用船运到待吊装桥位的下部，再将顶板上焊接的耳环与步履式吊机用销轴连接起吊，在浅水区一般采用搭设栈桥拖拉滑移梁段到桥位下的方法。

图 1-3-23　钢箱梁 0 号块梁段施工

图 1-3-24　斜拉桥钢箱梁悬臂拼装施工

梁吊装到位，准确调整对位后，对于高强螺栓连接的接头方式，即可按规定打入冲钉、穿上螺栓，进行连接；对于焊接的连接方式，即可连接匹配件，然后进行梁段焊缝的施焊。

(3)南京长江第二大桥钢箱梁吊装实例

①南京长江第二大桥 B3 标工程概况

南京长江第二大桥南汊主桥横跨长江主航道，设计为 58.5＋246.5＋628.0＋246.5＋58.5(m)五跨连续双塔双索面全断面焊接的钢箱梁斜拉桥。其 628m 的主跨跨径目标在同类型桥中居国内第一，世界第三。

B3 标为该桥上部构造预制钢箱梁的吊装架设及挂索张拉施工。施工范围北起 25 号过渡墩，南至 30 号过渡墩。跨越南汊河道，包括水上、桥面和塔上高空作业，施工面较广。其五跨连续钢箱梁总长为 1233.9m。根据桥址处自然条件、钢箱梁构造和施工架设的需要，主梁划分为 A～L 共 12 种类计 93 块梁段(见表 1-3-1)。标准梁段长达 15m，宽 38.2m，梁高 3.5m，

吊装质量近 300t(加上随梁附件)。斜拉索采用 7mm 镀锌高强度低松弛平行钢丝,外挤包高密度聚乙烯材料,标准索距为 15m(辅助跨为 12m),最大索长 335.743m,最大索重达 26.7t。如此大跨径桥梁施工、长拉索挂设、大吨位钢梁悬臂吊装,多工作面立体作业,其施工难度大,加之桥位处于长江下游地带,水深流急,浪高风大,过往船舶众多。这些对运梁船、放索船、浮吊的就位稳定、钢箱梁的悬吊及挂索施工的负面影响颇大。受江面水域的限制,悬吊和挂索施工又不可避免地占用相当范围的航道。因此,南、北塔须合理错开占用航道的时间,实施部分封航,尽量减轻施工对船舶通航的影响。另外,对此种地处强风地带的飘浮体系特大跨径桥梁,在合龙前由于悬臂很长,设置可靠的临时固结和抗风稳定系统是十分必要的。

钢箱梁分类表　　表 1-3-1

序 号	名 称	类型编号	数量(段)	梁段长度(m)	质量(t)
1	零号块梁段	A,B,C,D	14	7.5,7.25(D型)	133～174
2	标准梁段	E,F,J	66	15	260
3	辅助梁段	I,K	8	12	244～260
4	端梁段	L	2	10.7	260
5	边跨合龙段	H	2	8.25	155
6	中跨合龙段	G	1	约 6	约 96

②临时排架及吊、移梁工艺

辅助跨及边跨临时排架:由于预制钢箱梁需由船舶水运全桥位处起吊架设,为保证运梁船不能到达的无水和浅水区域钢箱梁的运输和安装,需在辅助墩和主引桥过渡墩间搭设临时支架并在辅助墩外一定水域内增设适当的临时墩,以搭设用于运移和临时搁置钢箱梁的施工排架和移梁轨道,以便利用浮吊将 L、K、I、H、J 及部分 E 型梁段吊至其上,然后沿轨道纵移就位焊接或临时搁置,待以后由零号块逐段延伸过来的桥面吊机起吊拼焊,来完成岸边钢箱梁的架设,为此设计了临时排架(如图 1-3-25 所示,北边跨类同,但过渡墩与辅助墩间支架为六四桁架)。

吊、移梁工艺:因大型浮吊起吊扒杆长度的限制和浮吊船本身需要一定的吃水深度,就排架周边的实际情况而言,它只适宜于靠在最外侧临时墩的背岸侧才便于自泊、停靠运梁船和将吊起的钢箱梁就近搁置在排架上。因此,在前面起吊的钢箱梁均需由落钩位置沿桥轴线向过渡墩方向纵移就位,考虑钢箱梁吊重大,从宁慢求稳的原则出发,制定了在排架上安装两排相距 15.2m(与钢箱梁纵隔板间距一致)的 2I 45b 作轨道,在其面板涂抹黄油并放置搁梁和移梁用的钢木滑块,用连续千斤顶配以钢绞线牵引滑移就位的方案,具体吊、移梁工艺步骤如下:

将 350t 浮吊顶推抛锚停靠于江中 7 号临时墩钻孔施工平台的背岸侧。这样,钻孔平台钢管桩能起到防止浮吊直接撞击 7 号临时墩的作用。

运梁船靠拢并自泊于浮吊外侧(中间以浮箱将两船隔离 3m 左右)。浮吊主钩携带专用吊具与钢箱梁临时吊耳连接,检查无误后预吊(带紧吊索),观察并拆除运梁船上的钢箱梁临时拉结保险葫芦。

指派专人指挥起吊,同时带紧两根临时风缆以保持梁体稳定。

当梁底高出排架轨道顶面后浮吊扒杆收幅,旋转 180°。

浮吊吊臂变幅微旋,将梁上的限位块对准排架上的限位装置(必要时,利用手拉葫芦),使钢箱梁纵隔板正对轨道缓缓下降将梁平稳地降落于轨道上的滑块上,卸除吊具。

通过上、下游各 4 根钢绞线将梁体或滑块与固定的 100t 连续千斤顶相连,同时牵引两束

钢绞线，将钢箱梁向过渡墩方向缓慢滑移。同时派专人在梁后面观察，通过对讲机与油泵操作手联络，以保证上、下游基本同步滑移，防止钢梁偏摆。

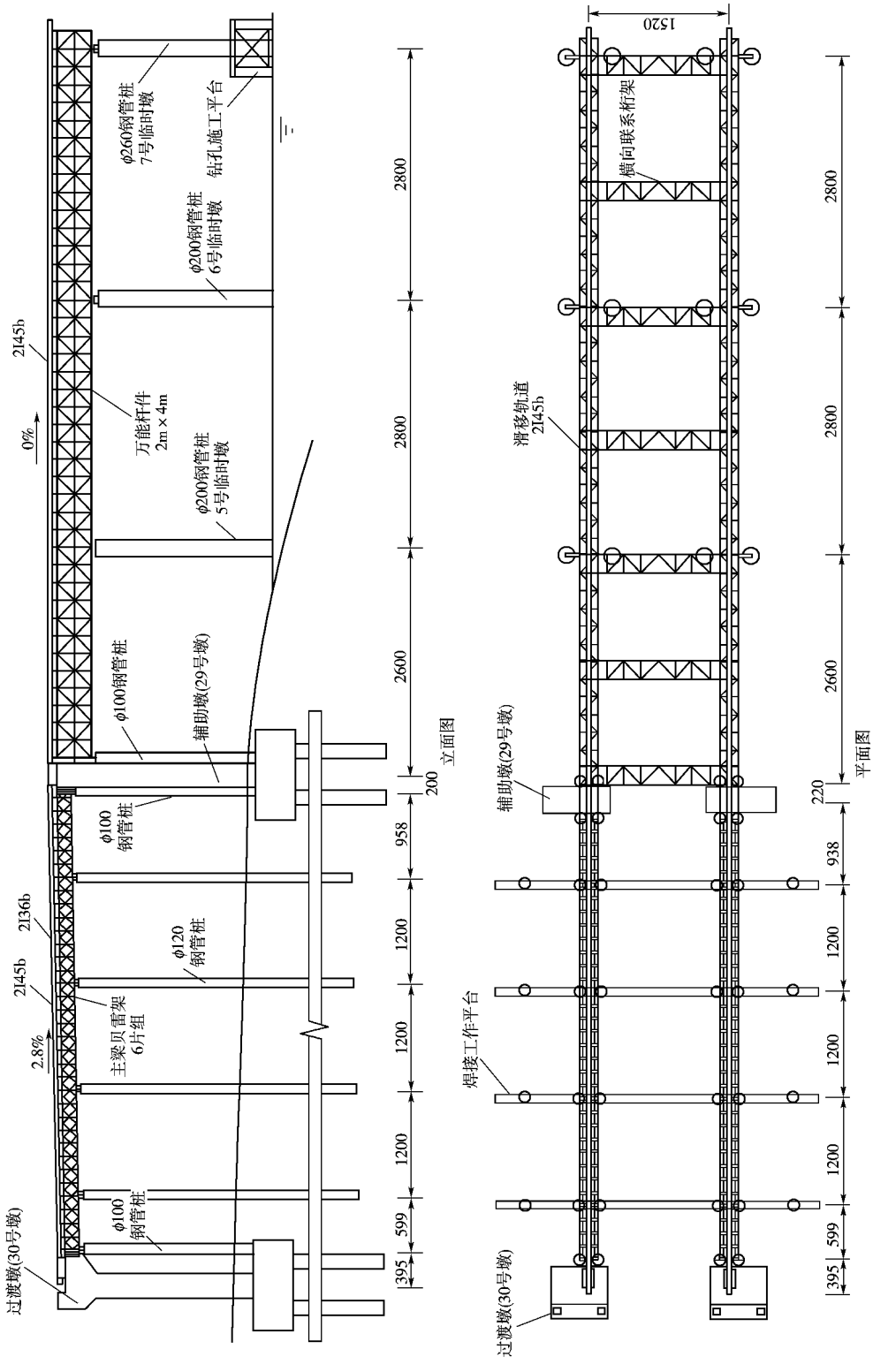


图 1-3-25　**南边跨钢箱梁施工排架**

重复上述所有步骤，直至临时排架上的 11 片钢箱梁全部搁满粗就位。

③无索区零号块施工

考虑施工浮吊的实际吊装能力，南、北索塔处每一零号块梁段分为 A、B、C、D 4 种类型，7 个块件。为方便该梁段的架设焊拼，临时固结，挂第一对索和在其上组装桥面吊机以便实施后面的对称悬吊施工。在完成索塔封顶后即开始在围堰内和索塔下横梁处搭设无索区零号块支承托架并在其上铺设移梁轨道。托架采用 12 根 ϕ1.2m 钢管桩为主立柱，支承在以承台上 ϕ3.4m钢护筒和钢围堰为基础的平台上，桩顶设万能杆件桁架的方案(图 1-3-26)。吊梁工艺与前述排架部分大致相同，浮吊先停靠在索塔岸侧依次吊完 A、B、C、D 梁段后再移靠到江侧吊完其余的 B、C、D 梁块。由于施工空间的限制，移梁方案改为用两台 60t 千斤顶推滑块前移，粗就位后再用 100t 扁顶、20t 机械顶配以钢楔块、钢板等在托架上精调直至达到设计的平面位置和高程后再施焊将七块梁段连成一体，焊接完成后即可挂设并张拉第一对斜拉索。利用下横梁上的预留孔道、预埋钢板、临时支座和钢绞线等将零号块与索塔下横梁临时固结，然后通过浮吊吊装桥面吊机及其滑行轨道、操作平台、撬座、油泵机等。上述工作完成后，浮吊即可退场，后续钢箱梁均可利用桥面吊机进行悬吊拼装。

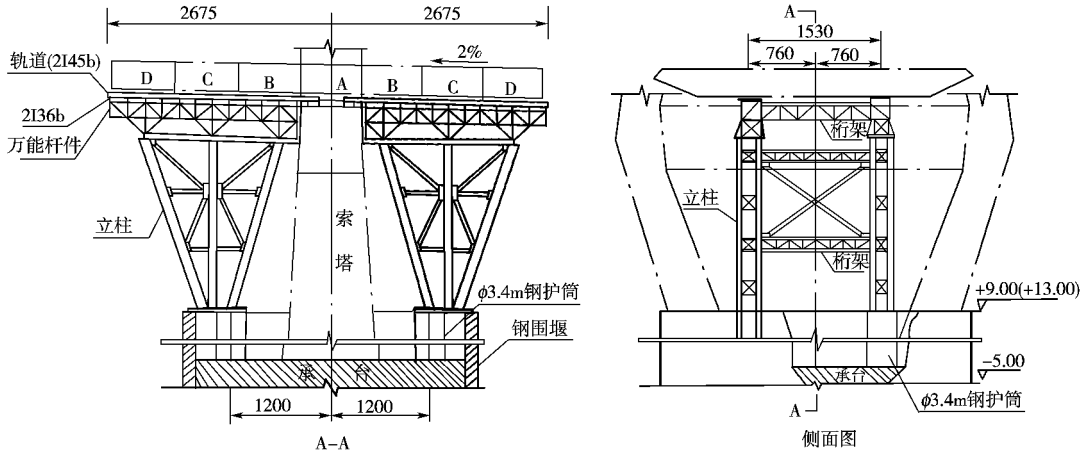


图 1-3-26　无索区支架布置图(尺寸单位：cm；高程单位：m)

④钢箱梁的悬吊、拼装

在完成桥面吊机的安装、试吊和第一对斜拉索的第二次张拉并拆除零号块与托架间的支承钢楔块后，即可开始对称吊装 E 型标准梁段(图 1-3-27)。其标准施工工序如下：

吊梁：南汊主桥钢箱梁的悬吊采用四台同型专用桥面吊机配以起吊机具两侧对称平衡起吊的方案。标准吊梁工艺如下：

运梁船自泊就位。

降下桥面吊机起吊钢绞线和扁担梁并与待吊钢箱梁临时吊耳连接，通过扁担梁上的 HZP38/800 千斤顶调整吊点重心位置，保证钢箱梁水平起吊。

缓缓收紧起吊钢绞线，通过主吊油泵油压表读数，控制每个吊点受力在 250kN 以内，检查吊机、吊耳情况。

利用联动控制箱和对讲机，通过指挥口令将江侧、岸侧主吊千斤顶同时起吊至 2×50t，千斤顶回油待命。

按上述第 4 个办法两边同时起吊至 2×100t，千斤顶回油待命。运梁船压水，以平衡船

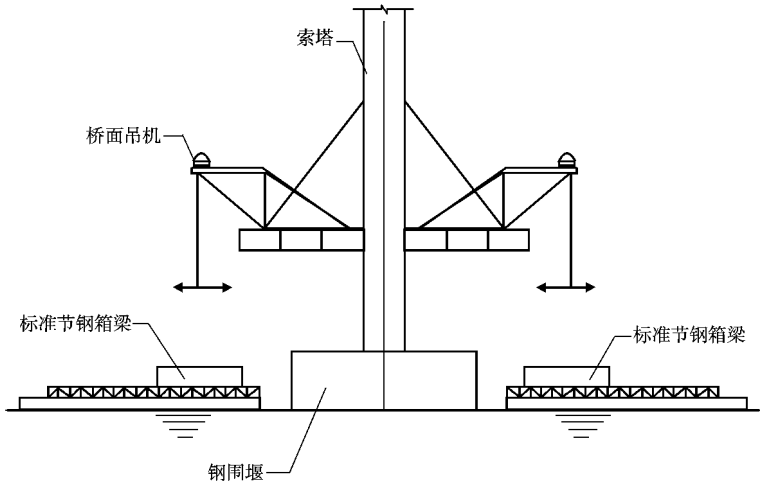


图 1-3-27　钢箱梁吊装示意图

体，同时施工人员拆除钢箱梁保险拉结装置，监理再次作最后的全面检查。

确认无误后，再按上述第 4 个的办法两边同时连续起吊，一次性将钢箱梁吊离运梁船。

继续起吊，同时指派专人观察；如果同一片梁上、下游不水平，可通过单独控制上游或下游主吊千斤顶行程来调整水平。

调梁：由于桥面有 2.8%的纵坡，当江侧、岸侧的在吊钢箱梁顶面分别高于或低于前一钢箱梁顶面约 30cm 高时，即可暂停起吊进入调梁阶段。先通过缓慢操作扁担梁上千斤顶微移吊点重心位置来调整钢箱梁顺桥向的倾斜度，使两相邻梁段同一位置上、下接口的缝隙宽度大致相等（将差值控制在 5mm 以内），这样，在吊梁段与成桥梁段纵坡大致相同；然后用油泵驱动吊机的主吊撬座使之向成桥梁段方向滑移，同时在两片梁之间挂上纵向和斜向手拉葫芦即可将梁拉拢，其间可根据需要微微起降扁担梁以实现两段钢箱梁的合龙和匹配，就位之后即可打入钢梁顶、底面中间位置的匹配件，连以螺栓并锁定主吊千斤顶。在夜晚日出之前再次进行微调，通过测量钢箱梁四角点设定位置的高程和轴线来精确定位。其中钢箱梁两侧主腹板处需焊上反力架并施以 32t 机械顶来调平，精调合格后打入全部匹配件并连好螺栓，即可交付 B2 标实施现场打磨焊接。

挂索：南汊主桥斜拉索为双索面空间索，编号为 A1～A20，J1～J20 每种数量 4 根，南、北塔对称，共计 160 根，长度为 101.325～335.743m，质量为 4.975～ 26.432t 不等（未计锚具质量），全部采用套筒式锚固形式，其下面为固定端锚固于钢箱梁腹板侧的锚箱上；上面为张拉端，锚固在索塔上塔柱内对应的齿板上。挂索工艺如下：

40t 浮吊将成品索盘吊放于分节驳船上专用的卧式放索架上，安装索盘配重块以便放索时索盘转动平衡。

拖轮顶靠放索驳船就位，通过布置在桥面上的两台卷扬机从上、下游放下两根钢丝绳与驳船连接以稳定之，同时拖轮不熄火随时顶推驳船复位。

用固定于索塔处的桥面卷扬机下放牵引钢丝绳与斜拉索张拉端相连。

卷扬机收索，牵引斜拉索张拉端锚头依次通过梁前端转向架和桥面上的平辊架至索塔附近的 B 号梁面上暂停。

安装锚头异径接头、张拉丝杆并与从对应于该号索的套筒内引出的牵拉钢丝绳（1～11 号斜拉索用）或钢绞线（12～20 号斜拉索用）连接，同时装好提升斜拉索专用钢抱箍，该抱箍通过

预安在塔顶的转向架和定滑轮由布置在桥面上的卷扬机起升斜拉索。注意抱箍所卡位置离锚头距离应大于对应套筒长度约 2m 左右，以不致被牵引进上塔柱的斜拉索套筒内。

同时牵引锚头丝杆和抱箍，缓缓提升斜拉索。注意放索船上用制动控制索盘平稳转动放索。当放至仅剩两圈左右时就通知暂停牵引，在固定端钻头处系上保险尾索以防锚头脱离盘时产生冲击和晃荡。

斜拉索末端上桥后停止牵引，撤除保险尾索，利用 25t 汽车吊将固定端锚头吊起贯入钢箱梁锚固箱内并施上锚杯固定之。

继续牵引直至能旋上张拉端锚头丝杆开合螺母、接长丝杆即能进行初张拉为止。

初张拉：在上塔柱内搭设满堂脚手架、上下楼梯和临时工作平台，搭设高度与张拉施工位置基本同步等高，以便于塔柱内施工机具的吊运。在对应的锚垫板上安装反力架、千斤顶、传感器，旋上丝杆螺母，接好油泵，即可开始进行斜拉索初张拉。通过油泵油表、600t 传感器和桥面上索力测量装置对张拉力进行控制直至达到设计的初始张拉值为止。

吊机前移：初张拉、钢箱梁接口焊接完成后，桥面吊机即可卸载，收起扁担梁。先将吊机行走轨道前移就位固定好，利用两台 100t 液压顶将吊机前沿移支点落于轨道上，解除后锚点反力销。上、下游各用一台 5t 卷扬机通过六门滑轮组，前端挂在钢箱梁临时吊耳上，后端与桥面吊机反力架相连，卷扬机同时收索，牵引桥面吊机沿轨道缓缓向前沿移，到位后用 20t 机械千斤顶通过钩住轨道翼缘的专用反力架，压下后锚点，打入四个保险销，最后仍用两台 100t 液压顶顶起前滑块并在四个前主支点下塞入适当厚度的钢板保持上、下游等高。

第二次张拉：吊机前移就位后，到夜晚即可进行斜拉索的第二次张拉，张拉控制的原则是以梁面高程控制为主，斜拉索索力控制为辅。各施工控制节段的高程误差纵向不大于 ±20mm；横向相对误差不大于 5mm。各施工控制节段的斜拉索索力误差纵向不宜大于张拉值的±2.5%；横向不大于 2%。为确保测力的准确性，千斤顶、油表、测量传感器还要求每张拉四对斜拉索即应标定一次，合格方能投入使用。

重复上述的施工工序，直至第 12 号索对应的梁段吊装，将边跨已成桥钢箱梁与 7 号临时墩通过 2 个铰支承和 8 根精轧螺纹钢固结，起到抗风稳定作用。继续重复前述的标准施工工序直至边跨和跨中合龙。

主梁合龙段施工：边跨合龙待 15 号斜拉索第一次张拉完后，将桥面吊机前移，再进行第二次张拉。由于边跨合龙段为非标准梁块，且成桥时梁底与排架轨道脱离不远，故此梁段可直接利用便携式 100t 扁千斤顶支承在排架轨道上将其顶起调整定位，然后将已焊接为一体的辅助跨五片梁在过渡墩和辅助墩上用四台 400～600t 的千斤顶将其顶起，拆去其下面辅助跨支架轨道上原用于支承和调梁的钢楔块等，在 L 号梁端与过渡墩间安装两台 60t 千斤顶，将辅助跨钢梁整体向江侧顶推约 50cm，精确定位后与边跨合龙段焊接合龙。

主跨跨中合龙：待 J20 斜拉索第一次张拉完后，仅前移南塔江侧的桥面吊机，就位后按计算数据第二次张拉 20 号斜拉索，对梁端进行 24h 或 48h 测量，根据测量结果确定驳船就位、合龙段吊装及连接时间，保证顺利合龙。

第四章 斜拉索的安装

DISIZHANG

第一节 斜拉索概述

一、斜拉索的间距

斜拉索的间距与主梁的刚度有关，也与斜拉索本身的强度和施工挂篮等设备有关。早期的一些斜拉桥采用较大的桥面刚度，因而索距较大，此外，对于一些顶推法施工的斜拉桥，也常常采用较大的索距。现代斜拉桥多采用多拉索、较小索具的方案，这是因为：

(1)梁的弹性支承使得桥面系在施工和运营期间桥面弯曲较小，可以采用简单经济的施工方法来施工。

(2)各索相对较小，安装与锚固简单。

(3)换索较为容易。

一般来讲，对于钢结构或钢-混凝土混合结构，钢主梁的索距大约在 8～24m，而对于混凝土主梁而言，索距常采用 4～12m。

二、索的种类及结构构造

1. 斜拉索的种类

如图 1-4-1 所示，对于大跨度斜拉桥而言，斜拉索主要有：平行钢丝束、钢绞线束和封闭式钢缆。

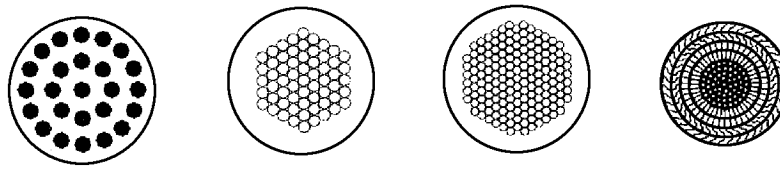


图 1-4-1 斜拉索基本类型

a)单根钢绞线；b)平行钢丝索；c)钢绞线索；d)封闭式钢缆

2. 钢丝索

将若干根钢丝平行并拢、扎紧、穿入聚乙烯套管，在张拉结束后采用柔性防护即形成拉索。其适合于现场制作。

将若干根钢丝平行并拢，同心同向作轻度扭绞（扭绞角 2°～4°），再用包带扎紧，最外层直接挤裹单层或双层聚乙烯套作为防护，就成为半平行索。其具有挠曲性能好，可以盘绕，具备长途运输条件，宜于工厂机械化生产，质量易于保证，因此正在逐步取代纯平行钢丝索。钢丝索配用镦头锚或冷铸锚。一般采用 $\phi5$ 或 $\phi7$ 钢丝制作。目前钢丝的标准强度已达 1770MPa。

3. 钢绞线索

钢绞线索由多股钢绞线平行或经轻度扭绞组成，其标准强度已达 2000MPa。其防护有两种形式：一种是将钢绞线穿入一根粗的聚乙烯管，然后采用柔性防护；另一种是将每一根钢绞线涂防锈油脂后挤裹聚乙烯套，再将若干根带有护套的钢绞线，穿入大的聚乙烯套管中，并压注柔性防护。集束后轻度扭绞得半平行钢绞线索一般在工厂制作好后运至工地。平行钢绞线索一般配用夹片锚具，先逐根张拉，建立初应力，然后整索张拉至规定应力。半平行钢绞线也可配用冷铸镦头锚。

4. 封闭式钢缆

封闭式钢缆是以一根较细的单股钢绞缆为缆心，逐层绞裹，断面为梯形的钢丝，接近外层时，绞裹断面为 Z 形的钢丝，相邻各层的捻向相反，最后得到一根粗大的钢缆。这种钢缆结构紧密具有最大的面积率，水分不易侵入，故得名封闭式钢缆。

封闭式钢缆使用镀锌钢丝，绞制时还可以在钢丝上涂防锈脂，最外层再涂防锈涂料防护。封闭式钢缆配用热铸锚具，在工厂制作后盘绕运至工地。

三、拉索的技术标准和基本性能

钢丝索的强度一般用公称破断索力衡量，一般为钢索公称截面和钢丝标准强度的乘积。由于组成钢索的各根钢丝的强度的差异，以及钢索拉力的不均匀分配，钢索的实际破断索力总是稍低于公称破断索力。

钢索的弹性模量受索中各根钢丝集合形式的影响。对于平行钢丝索，其弹性模量与组成平行索的单丝相同。但由于钢绞线索是由若干单丝绞扭而成，在索受力后，除了索中单丝的弹性伸长外，还有集合构造变形。所以，钢绞线的弹性模量普遍低于单丝的弹性模量。

表 1-4-1 所列为几种拉索的主要力学性能要求。

拉索的主要力学性能　　表 1-4-1

拉索类别	单丝类别	单丝				拉索				
		静载		动载		静载			动载	
		公称强度 R_{yb}（MPa）	极限延伸率（%）	应力上限（MPa）	应力幅（MPa）	效率系数	极限延伸（%）	弹性模量（MPa）	应力上限（MPa）	应力幅（MPa）
平行钢绞索	钢丝	1570	4.0	710	300	0.95	2.0	2.0×10^5	710	200
半平行钢丝索	钢丝	1570	4.0	710	300	0.95	2.0	1.95×10^5	710	200
平行钢绞线	钢绞丝	1860	3.5	840	200	0.95	2.0	1.90×10^5	840	160
半平行钢绞线索	钢绞丝	1860	3.5	840	200	0.95	2.0	1.85×10^5	840	160
封闭式钢缆	圆形	1470	4.0			0.92	2.0	1.85×10^5	840	160
	梯形									
	Z 形									

四、拉索长度计算

拉索长度是指拉索在设计温度时的无应力下料长度 L。每一根拉索的长度基数，是该拉索上下两个索孔出口处锚板中心的空间距离 L_0，对这一基数进行若干修正即得下料长度，计算简图如图 1-4-2 所示。

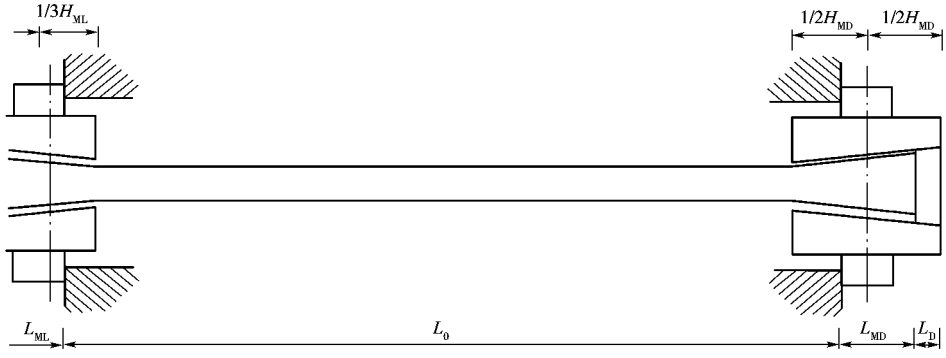


图 1-4-2　索长计算

对于冷铸锚：

$$L=L_0-\Delta L_e+\Delta L_f+\Delta L_{ML}+\Delta L_{MD}+2L_D+3d \tag{1-4-1}$$

式中：L——拉索下料长度；

L_0——每根拉索的长度基数，是该拉索上下两个索孔出口处在拉索张拉完成后锚固面的空间距离；

ΔL_e——初拉力作用下拉索弹性伸长修正；

ΔL_f——初拉力作用下拉索垂度修正；

ΔL_{ML}——张拉端锚具位置修正，如图 1-4-2 所示，最终位置可设定螺母定位于锚杯的前 1/3 处；

ΔL_{MD}——锚固端锚具位置修正，如图 1-4-2 所示，最终位置可设定螺母定位于锚杯 1/2 处；

L_D——锚固板厚度；

$3d$——拉索两端所需的钢丝镦头长度（每一镦头长度为 $1.5d$），d 为钢丝直径。

对于采用轧丝式锚具，不计入镦头长度，而要加上满足张拉千斤顶工作所需的拉索操作长度 ΔL_S 则式变为：

$$L=L_0-\Delta L_e+\Delta L_f+\Delta L_{ML}+\Delta L_{MD}+2L_D+\Delta L_S \tag{1-4-2}$$

弹性伸长量 ΔL_e 和垂度修正值 ΔL_f 分别为：

$$\Delta L_e=L_e\sigma/E \tag{1-4-3}$$

$$\Delta L_f=W^2L_x^2L_0/24T^2 \tag{1-4-4}$$

式中：σ——拉索设计应力；

E——拉索弹性模量；

T——拉索设计拉力；

L_0——拉索长度基数；

L_x——L_0 的水平投影；

W——拉索每单位长度质量。

如工厂下料时的温度和桥梁设计中取定的温度不一致，则在下料时还应加温度修正。采

用应力下料，则要考虑应力下料修正。

五、拉索设计弹性模量

柔性索具有一定垂度，索呈曲线状，是非线性问题。这里是将索视为一直线杆件，采用换算弹性模量，近似地使非线性问题线性化。拉索设计弹性模量（换算弹性模量）是指拉索在工程结构中表现出的弹性模量。按下式计算：

$$E=E_0/[1+(\gamma S\cos\alpha)^2/12\sigma^3] \tag{1-4-5}$$

式中：E——考虑垂度影响的拉索换算弹性模量（kPa）；

E_0——拉索弹性模量（kPa）；

γ——拉索换算重度（kN/m^3），γ＝每米拉索及防护结构材料重力（kN/m）/拉索截面积（m^2）；

S——拉索长度（m）；

α——拉索与水平线的夹角（°）；

σ——拉索应力（kPa）。

式（1-4-5）表明，选用高强度的材料，提高拉索的工作应力，采用轻而有效的拉索防护手段，使拉索每延米的质量不致过多增加，均有助于提高拉索刚度，降低其非线性影响。

第二节　斜拉索的安装

一、挂索、张拉及索力测量

挂索是将索的两端分别穿入梁上和塔上预留的索孔，并初步固定在索孔端面的锚板上。张拉是用千斤顶对拉索的索力进行调整，索力的大小由设计并根据各个不同的工况经计算后给出。

不同的拉索、不同的锚具，不同的斜拉桥设计，要求采用不同的挂索和张拉方式。

配装拉锚式锚具的拉索，可以借助卷扬机，直接将锚具拉出索孔后用螺母固定。当索长较大（大于 100m），重力超过 50kN，直接用卷扬机将锚具拉出洞口有一定困难。这时，可以将张拉用的连接杆先接装在拉索锚具上，用卷扬机拉至连接杆露出洞口，即可完成挂索。对于更长更重的拉索，由于卷扬机的牵引力有限，连接杆的长度就要相应加大。

根据拉索的长度 L，上、下两端索孔锚板中心的几何距离 L_0，可以估算出牵引力为 T 时拉索上端离塔柱上相应索孔锚板端面的距离 ΔL。

$$\Delta L=L_0-L+\frac{W^2L_x^2L_0}{24T^2}-\frac{TL}{AE} \tag{1-4-6}$$

根据算出的 ΔL，选定连接杆的长度，最好能使牵引力为 T 时，连接杆能在张拉千斤顶的后方露出，由千斤顶接替卷扬机继续牵引，完成挂索。较长的连接杆，可以由几节组成，千斤顶拉出一节，卸去一节，比较方便。

对于特长特重的拉索，卷扬机的牵引力有限，连接杆的长度也不能太长，可以在塔上的索孔中先穿入一束由若干根钢绞线组成的柔性牵引索，并在千斤顶上附设一套钢绞线束的牵引装置。卷扬机将拉索提升，至连接杆到达塔外索孔进口附近，即可和钢绞线束相接，从而利用千斤顶，将连接杆拉入索孔，完成挂索。

对于配装拉丝式夹片群锚锚具的钢绞线拉索，挂索时先要在拉索上方设置一根粗大钢缆

作为辅助索，拉索的聚乙烯套管先悬挂在辅助索上，然后逐根穿入钢绞线，用单根张拉的小型千斤顶调整好每根钢绞线的初应力，最后用群锚千斤顶整体张拉。

大部分斜拉桥采用塔上张拉方式，也有部分斜拉桥采用梁上张拉，但先挂索、后张拉索的程序不变。

斜拉索的索力是斜拉桥设计的一个重要参数，要在施工中准确控制索力，首先必须掌握索力测定技术。

目前，测定索力有以下三种方法：

(1)压力表测定千斤顶液压。由于千斤顶的张拉油缸中的液压和张拉力有直接关系，所以只要测定张拉油缸中的液压，就可求得索力。此种方法简单易行、实用。

(2)压力传感器直接测定。张拉时，千斤顶的张拉力通过连接杆传到拉索锚具，如果在连接杆上套一个穿心式的压力传感器，张拉时处在千斤顶张拉活塞和连接杆螺母之间的传感器，在受压后就输出电讯号，于是就可在配套的二次仪表上读出千斤顶的张拉力。压力传感器售价较高，精度较高，只在特定场合使用。

(3)频率法。即根据拉索的振动频率，换算索力。索的张拉和频率之间存在一定关系。频率法测定索力，设备可以重复使用，特别对于活载对索力的影响测定以及对索力进行复测时常选用此方法。

二、斜拉索减振

暴露于大气中的拉索在风雨天会出现振动。首先，气流在拉索的背风面生成卡门涡流，涡流激振的频率正好和拉索自身的某一阶自振频率合拍，于是拉索受激产生上下振动，并形成驻波。由于不是所有拉索都同时出现风激频率和自振频率同步的情况，因此，同一座桥梁上的拉索有的振动，有的不振动。其二，斜拉桥的桥面受风激出现上下振动，从而迫使全桥拉索振动。

振动导致拉索根部出现反复挠曲，索中钢丝产生附加挠曲应力，加速了钢丝的疲劳，因此拉索的风振应加以防止。

针对拉索的起振条件，只要将拉索自身的结构阻尼增加到某一程度，就可以使拉索不具备起振条件，从而防止拉索出现振动。常用方法是在拉索上设置阻尼支点。这种阻尼支点可以采用高阻尼黏弹性材料或黏性剪切型阻尼器来实施，也可以用油膜阻尼器实施。

高阻尼黏弹性材料是一种合成橡胶，其阻尼值比一般橡胶大 4～5 倍。用这种材料制作衬套，嵌在拉索和拉索钢导管之间构成阻尼支点(图 1-4-3)。拉索稍有振动，阻尼衬套就受到挤压并吸收能量，产生减振效果。

国内对采用黏性材料减振进行了多年的研究，如长安大学研制的黏性剪切型阻尼器先后

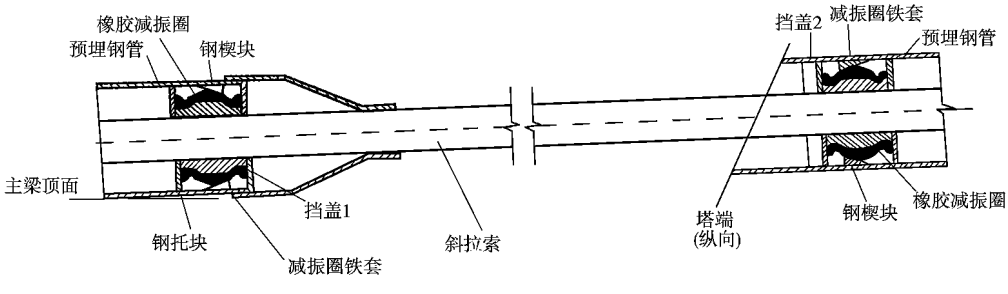


图 1-4-3　拉索高阻尼减振圈

用于安徽铜陵长江大桥和武汉长江二桥上。经现场测试，证明安装阻尼器后，拉索的振动得到明显的抑制。

设置附加阻尼支点后，除了拉索的振动能量被吸收外，整根拉索还被分隔为中间长、两边短的三段。这时拉索的固有频率有所提高，拉索的振型也有所变化。当中间段拉索受风振发生振动时，振动的波形有一部分通过阻尼圈(器)成为透射波，到达拉索端点后再反射。反射波和透射波相互干扰，也减少了拉索的风振。

对于因桥面受风激产生上下振动而带来的拉索振动，其减振方法在于改进桥面的气动特性，目前正进行这方面的研究，此处从略。

三、斜拉索防护

拉索是斜拉桥长期暴露的结构构件，因此，必须针对侵蚀性环境的影响，特别对腐蚀加以防护，工程实践中由于拉索的腐蚀而导致索修复和更换的例子并不鲜见。

在过去，多数拉索是安装在管道内，并灌注水泥浆以保护拉索钢丝、钢绞线或钢筋免于腐蚀。这种方法至今仍在应用。其最大的问题是，结硬的水泥浆抗拉强度很低，拉索弹性伸长时会开裂。但只要此种裂缝很小且管道紧密，防护仍是有效的。

近年来，现代斜拉桥广泛采用了一些更为有效的防护措施，例如，钢丝镀锌，将钢丝或钢绞线用塑料材料(油脂、石蜡、弹性环氧产品等)包裹，每根绞线均设置管道等。实际上常采用上述的综合防护措施，且都在工厂进行，既保证质量，又便于安装。

1. 拉索管道

除了封闭式拉索外，一般拉索均设置于钢制或塑料管道中，这在一定程度上防止了侵蚀性环境的影响。这种措施的有效性主要取决于拉索的类型和附加的防护措施，特别是灌入材料和包裹材料。

塑料管道(如聚乙烯材料)具有柔性，易于放置和安装。然而，这种柔性导致沿拉索轴线轻微的不平整起伏，损坏结构的视觉外观。这可以通过设置足够的隔板和限定灌注水泥浆的压力(可达 2MPa)得到改善。

2. 镀锌

将钢丝浸入镀锌池，自动控制完成。镀锌量取 250～330g/m^2，形成的防护层厚度为 25～45μm。尽管采用镀锌方法对材料强度有所降低，但由于其良好的防护效果，采用此法还是可靠的。

3. 锚具防护

管道和锚具之间连接构造必须防止水的流入或汇集，在关键部位的防水有不同的设施布置，如图 1-4-4 所示。

4. 事故防护

拉索设计必须考虑事故造成的危险，例如车辆撞击、火灾、爆炸和破坏等防护。为此应考虑：

(1)拉索下部 2m 范围内用钢管防护，生根于桥面并和拉索管道相接。

(2)钢管的尺寸(厚度、间距)和锚固区的加强要足以抵抗火灾和破坏的危险。

(3)锚固区要予以加强以抵抗车辆撞击。

(4)防护构件的替换不影响拉索本身，并尽可能的不影响交通。

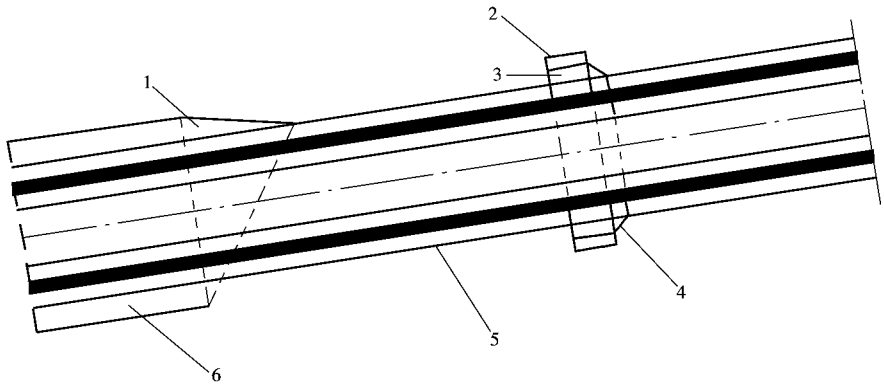


图 1-4-4　锚具防护

1-砂胶或其他材料填塞；2-防水层；3-绕拉索的水密模塑制品；4-填塞物；5—拉索外层防护；6-锚杯

四、斜拉索的安装

1. 斜拉索的放索及索的移动

(1)放索

为了防止索在运输过程遭受损伤，大跨度斜拉桥的拉索通常采用钢结构焊成的索盘将索卷盘，然后运至工地安装。

①立式转盘放索。如图 1-4-5 所示，将索盘架立在一个三角支架上，使其绕轴转动，即可将索放出。

②水平转盘放索。对于自身成盘的索，可设置一水平转盘，将索盘安放在转盘上，使索盘绕竖轴转动即可将索放出，如图 1-4-6 所示。

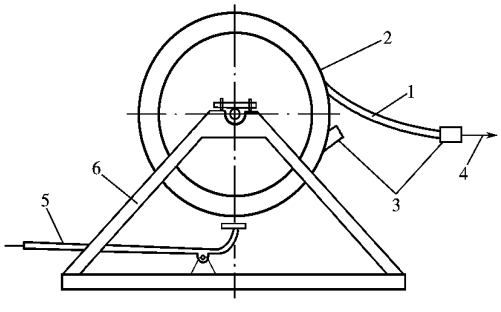


图 1-4-5　立式转盘放索示意

1-拉索；2-索盘；3-锚头；4-卷扬机牵引；5-制动装置；6-支架

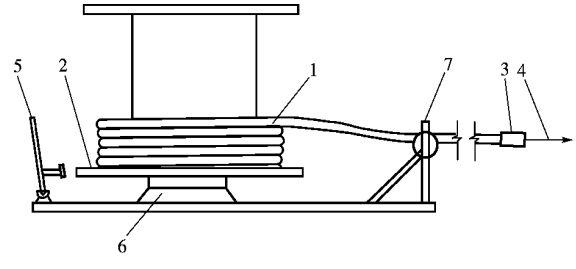


图 1-4-6　水平转盘放索示意

1-拉索；2-索盘；3-锚头；4-卷扬机牵引；5-制动装置；6-托盘；7-导向滚轮

由于索盘自身的弹性和牵引力产生的偏心力，会使索盘在转动中产生加速，导致散盘，危及施工人员和设备的安全，所以，对转盘要设置制动装置，或者以钢丝绳作尾索，用卷扬机控制放索。

(2)索的移动防护措施

为了避免索在移动过程中与桥面等直接接触而受到损坏，一般要采取以下方法或措施：

①由船运的索，可以在桥面上放索，也可以在船上放索，前者要在梁上设置吊装装置，将索盘吊至桥面安放，后者须在梁端设置转向装置，如图 1-4-7 所示。

②滚筒法。如图 1-4-8 所示，在桥面上设置一条滚筒带，滚筒的半径和材质软硬要与索相

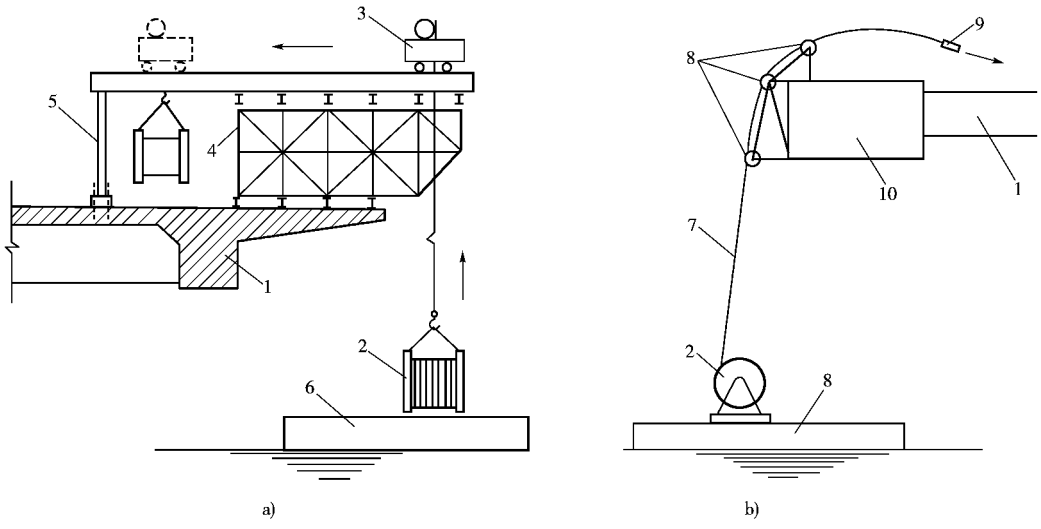


图 1-4-7　**索盘提升与转向装置**

1-**主梁**；2-**索盘**；3-**起重平车**；4-**导架**；5-**锚固杆**；6-**运索船**；7-**拉索**；8-**转向轮**；9-**锚头**；10-**挂篮支架**

适应，两相邻滚筒的间距要保证索在移动过程中不与桥面接触，当索放出后沿滚筒运动即可安全地到达起吊点。

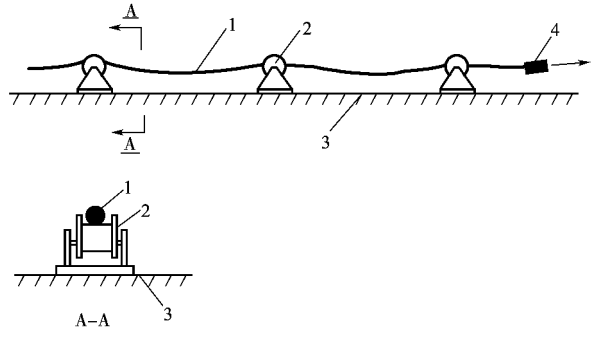


图 1-4-8　**滚筒法移索**

1-**拉索**；2-**滚轮**；3-**桥面**；4-**锚头**

③移动平车法。当索上桥面后，以索不触桥面为原则，每隔一定距离放置一个平车，由平车载索前移，如图 1-4-9 **所示。注意根据梁体表面的凹凸不平情况，设定适宜的平车轮径，以使平车平顺运动。**

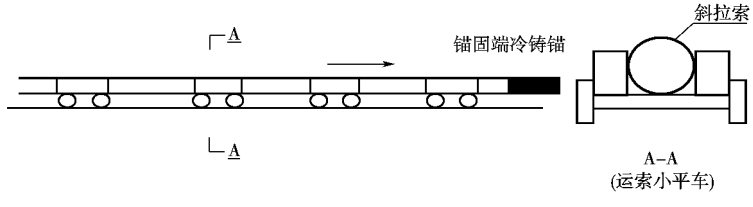


图 1-4-9　**放索平车布置示意**

④导索法。在索塔上部安装一根斜向工作悬索，当斜拉索上桥后，索的前端与牵引索相连，每隔一段距离设置一个吊点，使拉索沿着导索运动，如图 1-4-10 **所示。**

2. 斜拉索的塔部安装

若斜拉索的张拉端在梁部，则先将索在塔端安装，反之，则先将索在梁端安装。

索锚固端在塔部的安装方法有：吊点法、吊机安装法、脚手架法、钢管法等，索在塔部安装张拉端的方法有：分步牵引法、桁架床法等。对于大跨度斜拉桥，比较适用的主要是吊点法、吊机安装法和分步牵引法。

(1)吊点法

①单吊点法。拉索上桥面后，将牵引卷扬机的牵引绳从索塔孔道中放下，与拉索前端连接，在离锚具下方一定距离设一个吊点，索塔吊架用型钢组成，在支架上设转向滑轮。当锚头提升到索孔位置时，利用牵引绳和吊绳相互配合，将锚头准确地牵引进入索塔孔道内并初步固定。其作业如图 1-4-11 所示。

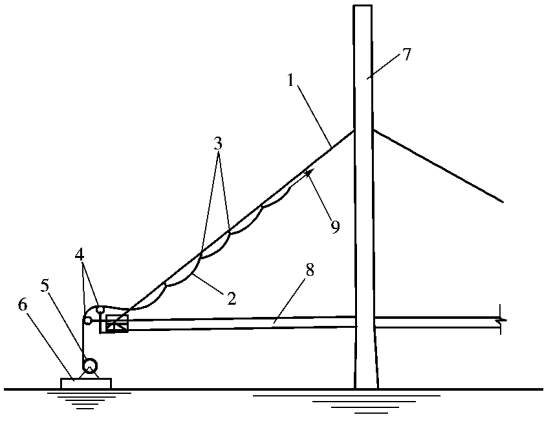


图 1-4-10　导索法安装拉索(多吊点法)

1-导索；2-待安装拉索；3-导索支轮；4-转向轮；5-卷扬机；6-驳船；7-索塔；8-主梁；9-拉索锚头

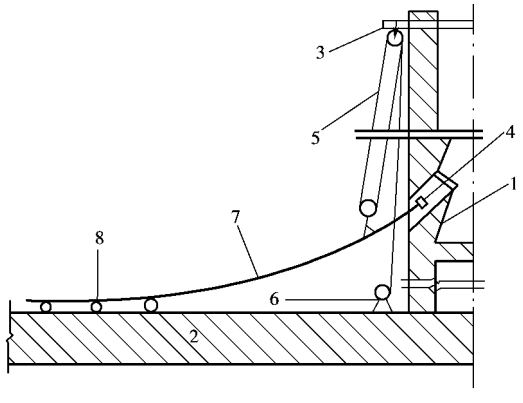


图 1-4-11　单吊点法安装拉索

1-索塔；2-主梁；3-预埋牛腿；4-牵引索；5-滑轮组；6-卷扬机；7-斜拉索；8-滚轮

单吊点法简便、安装迅速，缺点是起重索所需要的拉力大，斜拉索在吊点处弯折角度较大，故一般适宜于较柔软的短拉索。

②多吊点法(导索法)。多吊点法由于将索重力分散到多点承受，所以，索的弯折小，在牵引过程中索大致保持直线状态，两端无需大吨位千斤顶牵引。

(2)吊机安装法

利用索塔施工的吊机，用特制的扁担梁捆扎拉索起吊。拉索前端由索塔孔道内伸出的牵引索引入索塔拉索锚孔内，下端用移动式吊机提升如图 1-4-12 所示。

(3)分步牵引法

根据斜拉索在安装过程中索力递增的特点，分别采用不同的工具，将索安装到位。首先用大吨位的卷扬机将索张拉端从桥面提升到预留孔外，然后用穿心式千斤顶将其牵引至张拉锚固面。前一步采用柔性拉杆，后一步采用宝塔式刚性拉杆分步牵引，如图 1-4-13 所示。

分步牵引法的优点是牵引功率大，辅助作业少，桥面无附加荷载，便于施工。

需要强调指出的是，在以上各种挂索过程中，各种构件连接现象较多，如锚头与拉杆、牵引头的连接，滑轮与塔柱拉索的连接等，任何一处发生问题就可能导致较严重的事故，所以，在施工中应特别注意各构件连接的可靠性。

3. 斜拉索的梁部安装

梁部安装的基本步骤与塔部基本相同，方法主要有以下两种。

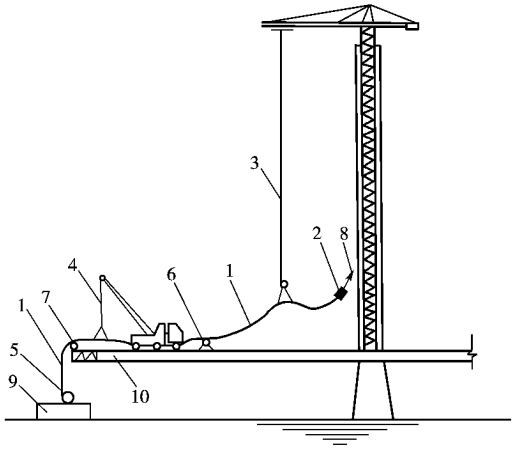


图 1-4-12　吊机安装法示意

1-斜拉索；2-锚头；3-索塔起吊索；4-吊车；5-索盘；6-滚轮；7-转向轮；8-牵引；9-运索船；10-主梁

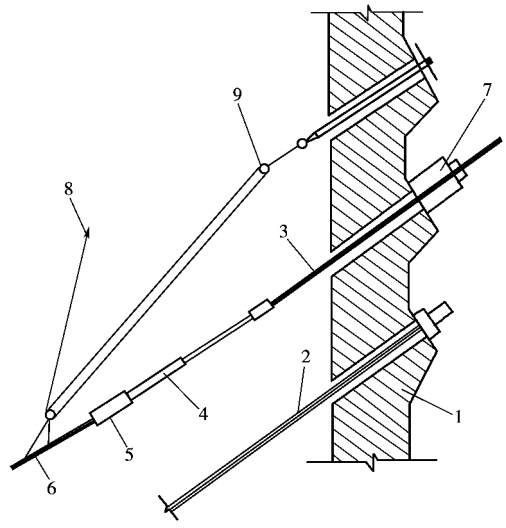


图 1-4-13　拉索分步牵引索

1-索塔；2-已安装拉索；3-钢绞线；4-刚性拉杆；5-拉索锚头；6-待安装拉索；7-千斤顶；8-卷扬机牵引；9-滑轮

(1)吊点法

在梁上安装转向滑轮，牵引绳从套筒中伸出，用吊机将索吊起后，随锚头逐渐地套入套筒，缓缓放下吊钩，向套筒口平移，直至将锚头穿入套筒内，如图 1-4-14 所示。

(2)拉杆接长法

对于梁部位张拉端的索的安装，采用拉杆接长法较为简单。先加工长度为 50cm 左右的短拉杆与主拉杆连接，使其总长度超过套筒加千斤顶的长度，利用千斤顶多次运动，逐渐将张拉端拉出锚固面，并逐渐拆掉多余的短拉杆，安装锚固螺母，如图 1-4-15 所示。

运用拉杆接长法，要加工一个组合式螺母，采用这个螺母逐步锚固拉杆，直至将锚头拉出锚板后拆除。

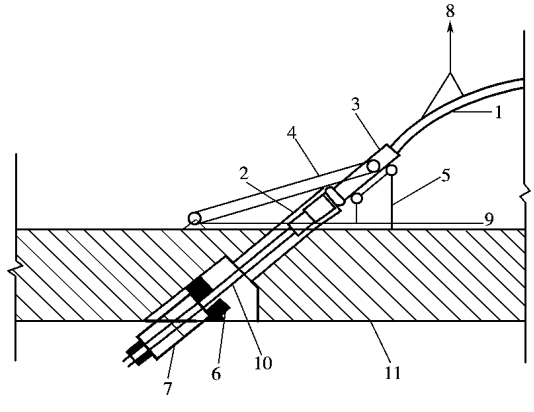


图 1-4-14　吊点法

1-斜拉索；2-连接器；3-钢套管；4-滑轮组；5-滚筒托架；6-反力梁；7-连续千斤顶；8-索吊车；9-卷扬机；10-钢绞线；11-主梁

(3)斜拉索梁面安装时的辅助措施

大跨度长斜拉索在梁面第一次张拉时，由于垂度较大，如果在锚管前没有支撑，在引索时可能会刮伤斜拉索的保护层，而且锚垫板的位置也容易发生偏移，为了避免这种情况的发生，针对挂篮悬浇段和支架现浇段的特点，可分别采用如图 1-4-16 和图 1-4-17 所示的支撑架。对于挂篮端引索支撑架，通过改变三角撑的角度来适应不同角度的斜拉索，牵引斜拉索时，斜拉索由于垂度下弯，三角撑上三个滚动销随斜拉索向下滚动，斜拉索的角度改变，当前边 2 个滚动销脱离斜拉索时，后面的滚动销就会向上滑，始终保证 3 个滚动销紧贴斜拉索而起到支撑作用。对于支架现浇的梁面斜拉索的张拉，用如图 1-4-17 所示的支架，即可保证斜拉索不会擦伤。

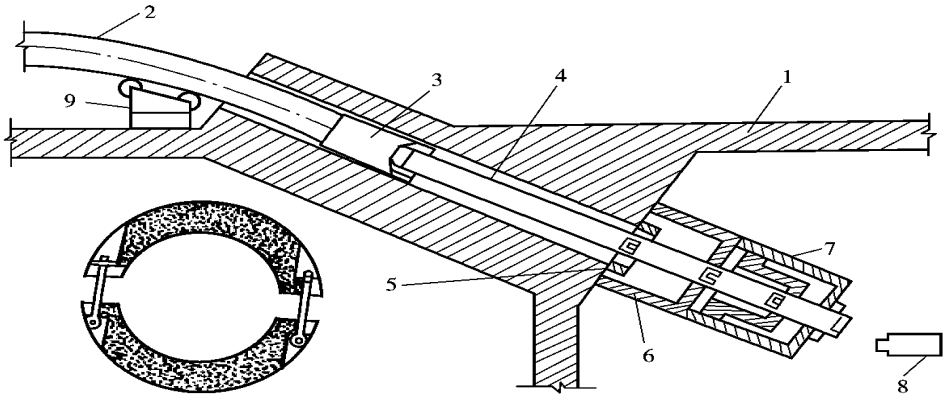


图 1-4-15　拉杆接长法

1-主梁；2-拉索；3-拉索锚头；4-长拉杆；5-组合螺帽；6-撑角；7-千斤顶；8-短拉杆；9-滚轮

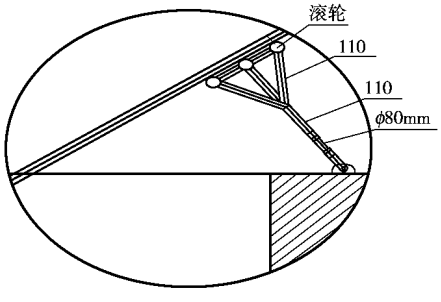


图 1-4-16　挂篮段引索支撑架

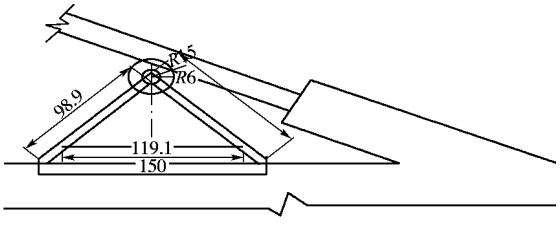


图 1-4-17　现浇端引索支撑架(尺寸单位：cm)

(4)钢绞线斜拉索的张拉

对于钢绞线斜拉索，在挂索时先在拉索的上方设置一根钢缆作为辅助索，将拉索的 PE 套管悬挂在辅助索上，然后逐根出入钢绞线，先单根张拉每根钢绞线，如图 1-4-18 所示。最后再整束张拉锚固钢绞线索。具体工艺如下：

图 1-4-18　单根钢绞线张拉示意

将压力传感器安装在张拉端第一根钢绞线上，以后每根钢绞线的张拉力按压力传感器变化情况进行控制，调整张拉千斤顶直至第二根钢绞线压力传感器读数与第一根相同；将压力传感器移至第 3 根钢绞线，调整张拉千斤顶直至第 3 根钢绞线与第 1 根相同，重复以上过程直至全部钢绞线张拉完成。注意在单根钢绞线张拉时，要以张拉顶压支座作反力架，用专用顶压器对钢绞线逐根顶压；当挂索完成后，安装夹片防松板，使每根钢绞线锚固牢靠，不滑丝、不退锚。钢绞线索的施工工艺流程如图 1-4-19 所示。

4. 斜拉索安装实例

(1)概述

南京长江第二大桥(以下简称“南京二桥”)南汊桥横跨南京市和八卦洲之间的长江江面，是一座双塔双索面五孔连续钢箱梁斜拉桥，全长 2958m。主桥长 1238m，桥跨总体布置为

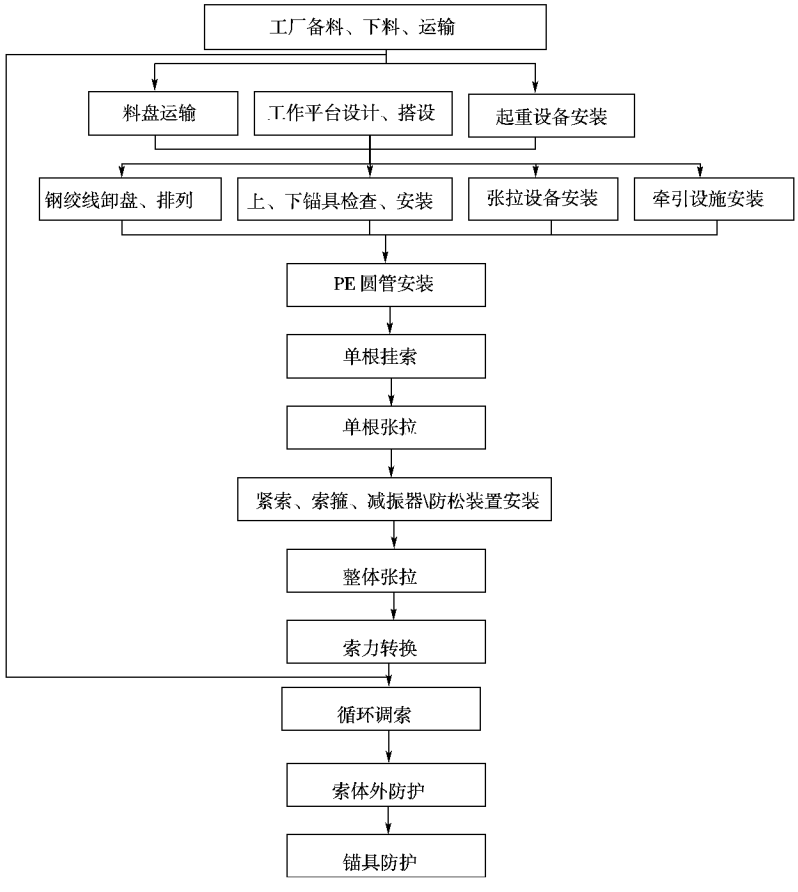


图 1-4-19　**钢绞线索的施工工艺流程**

58.5＋246.5＋628＋246.5＋ 58.5(m)，**桥面总宽** 35.6m，**主梁采用扁平闭口流线型钢箱梁，梁体最大宽度为** 37.2m(**包括风嘴**)。**索塔位于长江通航主航道上，总高为** 195.55m(**包括预抬量**)。**主塔由下塔柱、中塔柱、上塔柱及下横梁、中横梁、上横梁组成。外形为倒** Y **形空间结构。南京二桥主桥总体布置如图** 1-4-20 **所示。**

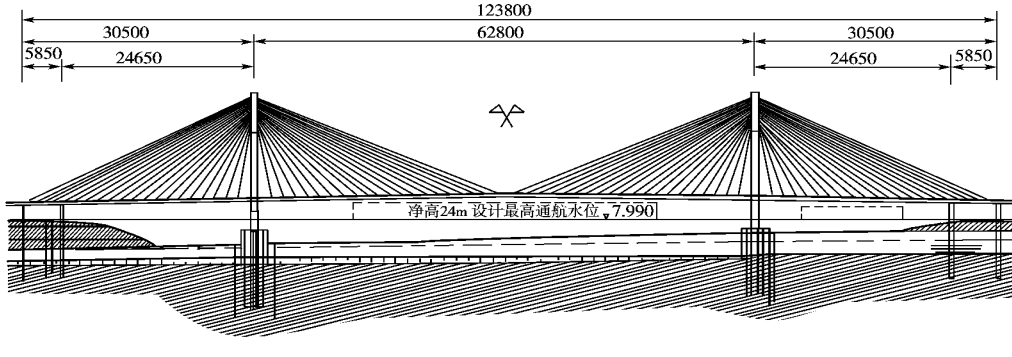


图 1-4-20　**主桥总体布置(尺寸单位**：cm)

①**斜拉索类型的选择**

当前国内外斜拉桥采用的斜拉索主要分为平行钢丝索和钢绞线索两种。综合考虑各种因素，南京二桥斜拉索采用平行钢丝索，其优点是：耐久性和抗疲劳性能好；国内有专业化的制索

工厂，有较成熟的生产工艺和生产能力，价格较便宜；冷铸锚在工厂内加工，可以试拉，质量可得到保证；应用历史长，施工单位施工技术成熟。

②斜拉索的规格及布置

每个索塔上布置空间双索面扇形斜拉索，每个索面 20 对斜拉索，全桥共 160 根。索在梁上的锚固间距，索塔两侧为 21.5m，钢箱梁标准段为 15m，边跨部分为 12.5m 和 12m。索在塔上的锚固间距为 1.75～2.5m。南京二桥斜拉索有五种规格，分别为：ϕ7-139，ϕ7-163，ϕ7-199，ϕ7-241，ϕ7-265，其中最长的斜拉索长 336.7m，质量 27.02t。

(2)斜拉索施工主要设备

每个主塔斜拉索施工设备主要包括：QTZ 125 型机械自升式塔吊一台，25t 汽车吊一台，5t 卷扬机 12 台。8t 卷扬机 4 台，6 门滑轮 32 个，600t 张拉千斤顶 2 台，500t 千斤顶 2 台，120t 连续千斤顶 2 台及油泵 4 台，600t 传感器 4 台，施工电梯 2 台，放索船 1 艘，40t 浮吊 1 艘，以及张拉丝拉杆等。

①塔吊

塔吊和汽车吊是主塔斜拉索施工的主要起重设备。在主桥钢箱梁施工前，拆除主塔施工塔吊，在索塔上横梁顶中心安装 QTC 125(TC 5023)型塔吊，主要负责完成斜拉索安装过程中的高空吊装工作。该塔吊最大工作幅度 50m，最大起重力矩 1432kN·m，最大起重量 8t。另外，在主梁第二对斜拉索张拉完成后，利用水上浮吊把 1 台 25t 汽车吊起吊到主梁上，主要负责完成塔吊工作幅度以外的吊装工作，二者都能满足施工中的吊装要求。

②施工电梯

施工电梯是主塔斜拉索施工时工作人员上、下的主要交通工具。1 台施工电梯，布置在桥轴线上索塔的江侧，距主塔横轴线 6m 处，施工电梯从钢围堰顶面平台到钢箱梁底面施工平台，其输送高度为 23m，每 8m 设置一个附墙。另一台电梯安装在索塔下游塔肢中塔柱空腔内，从下横梁顶面直到中横梁底面，其输送高度为 87m，电梯的安装斜度与中塔柱的斜度保持一致，附墙与电梯预埋件相连。此外，在上塔柱内设置脚手架通道及斜拉索张拉平台，其布置如图 1-4-21 所示。

(3)斜拉索的放索、牵引、安装与张拉

①斜拉索放索船的定位

斜拉索放索船的定位有两种方案：第一种，放索船抛锚定位法。即每次挂索前把放索船顶推到指定位置，在放索船的四个角上分别抛锚，通过收、放锚链来调整放索船的位置。优点是放索船受水流冲击影响小，缺点是占用航道时间长，阻塞航道。第二种，放索船风缆、拖轮共同定位法。优点是操作简便快捷，占用航道时间很短，安全可靠，并有成功经验；缺点是要时刻观察水位变化，防止风缆受力过大，影响主梁焊接，经过研究，斜拉索放索船的定位采取第二种方案，具体施工工序如下：

斜拉索运送到施工水域后，按编号转移到放索船的放索架上，在钢箱梁的环焊缝焊接完成后，用 120 PS 拖轮把放索船顶推到主梁端部的正下方，放索船的长度方向与主梁横断面方向一致，这时，从钢箱梁前端的上、下游各放一根 ϕ9.5mm 卷扬机钢丝绳，拴住放索船内侧上下游的拉环，起动卷扬机，使钢丝绳受力适中，同时利用拖轮调整放索船的平面位置，通过目测，保持放索架上斜拉索转盘处钢箱梁前端的斜拉索位于转向架的正下方。此时，放索船定位完毕。放索船定位方案图 1-4-22 所示。

②斜拉索的牵引及安装

整个挂索过程粗略可分为两个阶段：第一阶段，牵引提升，使整根拉索脱离索盘，将两个冷铸锚头分别灌入索塔及箱梁的预定锚固孔道，并固定；第二阶段，张拉至设计吨位，并根据主梁悬臂端荷载及高程适当调整索力。

在斜拉索的牵引阶段，拉索尾端在江面的放索船上，中间部分置于桥面，上端被牵引至索塔锚固区附近（图 1-4-23），头尾垂直高度差为 120～180m，水平距离为 20～300m，属于典型的大跨度空间立体施工作业，因此，要科学地制定施工程序及细节，合理地安装提升系统的机具设备，精心组织，统一协调指挥，才能安全、快捷地完成一系列的牵引提升动作。

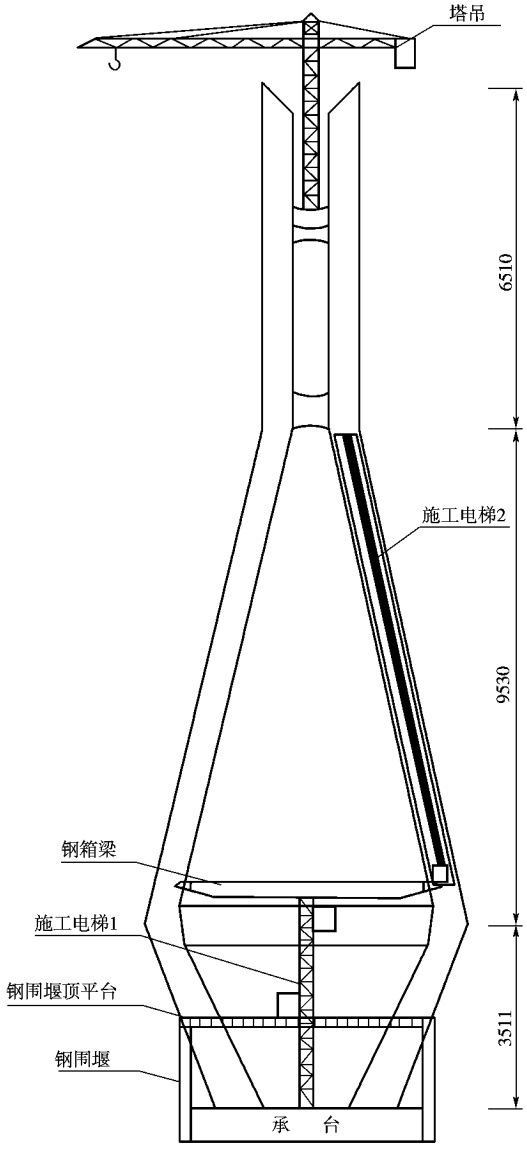


图 1-4-21　索塔施工主要设备示意（尺寸单位：mm）

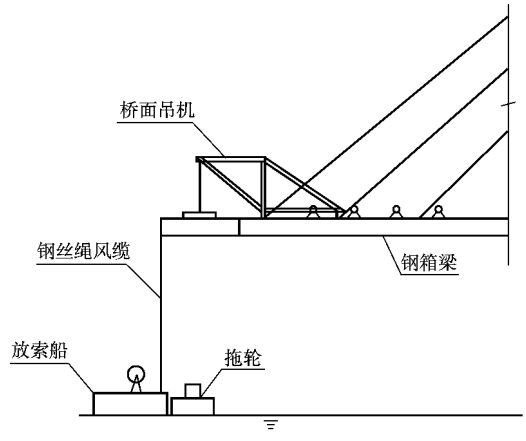


图 1-4-22　放索船定位方案图

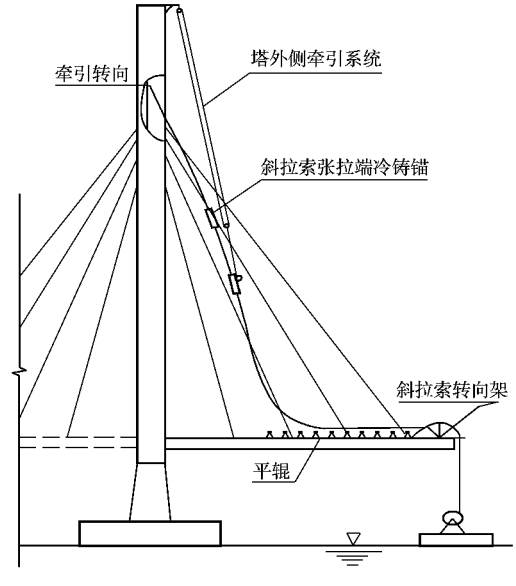


图 1-4-23　斜拉索的牵引安装示意

牵引提升系统的布置和安装：

斜拉索施工最常用的牵引装置为卷扬机，这里用到两种型号的卷扬机：8t 快速卷扬机，额

定拉力 8t，平均绳速 32.25m/min，容绳量 343m，电动机功率 30kW；5t 慢速卷扬机，额定拉力 5t，平均绳速 9.11m/min，容绳量 250m。两种型号卷扬机均配置 ϕ19.56－37－39－1700 钢丝绳。其中：四台 5t 慢速卷扬机对称安放于索塔根部路线石内侧，分别朝向主梁前端，其作用是将拉索张拉端从江面船上放索架的索盘中引出，通过钢箱梁前端转向架引至桥面，并平拖至索塔根部附近，待进一步提升牵引；作为主提升用的 4 台 5t 快速卷扬机对称安放于无索区的南北两端的桥轴线两侧，其钢丝绳通过塔顶定滑轮组(3 门 32t)走 3～4 丝形成滑轮组，用于将拉索张拉端提升至索塔锚固区相应套街口附近；在塔顶搭设平台，安放两台 5t 慢速卷扬机，其钢丝绳经过转向从斜拉索套筒放出，其作用是将张拉端锚头牵引进入套筒；在距钢箱梁前端 0m 处，上、下游两侧各安一台 5t 慢速卷扬机，南北共 4 台，其钢丝绳从梁前端放下，用于稳住江中的放索船，待斜拉索完全脱离放索船到达桥面，此卷扬机还可用于牵引锚固端锚头进入钢箱梁锚箱，此卷扬机随钢梁向前延伸而迁移位置。

上述即为牵引系统卷扬机的布置，具体安放与操作时应注意以下四点：

第一点，应选用与卷扬机相匹配的钢丝绳及转向滑轮，这里选用 ϕ19.5 钢丝绳，破断拉力总和为 22.4t；单门转向滑轮最大受力状况即转向 180°。受力为卷扬机单丝的两倍，因此，5t 卷扬机应配置承受能力为 10t 的单门转向滑轮。

第二点，从卷扬机滚筒引出钢丝绳经过的第一个转向滑轮，其转向点与滚筒轴线的中点的连线应垂直干滚筒轴线，该点到滚筒的距离应为滚筒长度的 10～15 倍，钢丝绳才会在滚筒上自然排丝，若场地有限，距离不够，则应设专人排丝，严防钢丝绳跳出滚筒，引发事故。

第三点，塔顶定滑轮组的吊点支架，其预埋件应在索塔施工中提前安装好。

第四点，每次挂索前都应全面检查卷扬机制动器、开关箱、钢丝绳的磨损状况，转向装置是否符合受力要求，确保消除隐患后再开始工作。

斜拉索施工牵引阶段施工程序及要点：

施工程序如图 1-4-24 所示。这一阶段施工作业面长、危险性大，要做到安全文明施工，应掌握的施工要点及细节有以下九个方面：

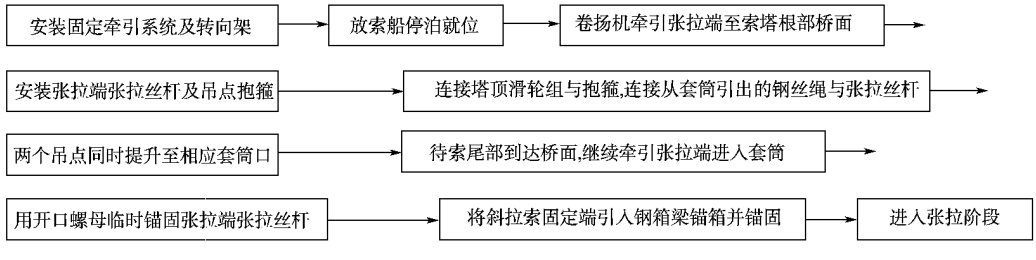


图 1-4-24　施工程序图

第一，各作业点指挥人员应用对讲机及时联系、统一步调、协调指挥。卷扬机应选出有经验的工人定岗定人专职操作，遇到紧急情况能及时作出正确的反应。另外，电工、机械修理工，应在现场待命，随叫随到，及时排除电器及机械故障。

第二，所有起重用的钢丝绳、卸扣、转向轮等均应符合起重行业施工规范，具有足够的安全系数。

第三，斜拉索放索架应安装配重，并有制动装置。张拉端冷铸锚杯被牵引出索盘后，当固定端锚具转至索盘最高点。由于力矩不平衡，索盘会发生突然加速转动，使得放索速度时快时慢很不安全，也容易损坏斜拉索，因此，应根据固定端锚杯质量在其所处直径的另一端加配相

同质量铁块以平衡力矩，使得索盘能匀速转动。

第四，张拉端锚杯通过前端转向架时，应尽量使其从平辊中间位置通过，以不受阻碍地到达桥面。

第五，为保护斜拉索外包装，应在桥面上斜拉索经过的沿途设置平辊，平辊过索槽净宽度应大于最大直径的锚杯 5～6cm。

第六，张拉端被牵引至索塔根部附近处，即开始安装吊点抱箍及张拉丝杆，准备向上提升。这个工作很关键，必须认真细致地完成。抱箍应有足够的长度，其夹紧用的螺栓应有足够的强度，拧紧后应使抱箍与斜拉索之间（垫有橡胶皮）产生足够的摩擦力，以防止抱箍受力后滑移。这里，我们使用的抱箍长 80cm，两侧法兰边各有 8 个 M22 高强螺栓。张拉丝杆通过一个内外有螺纹的接头与冷铸锚杯连接，另一端与牵引钢丝绳连接。经实际使用证明，张拉丝杆螺距不宜太小，在受力计算可通过的前提下，螺距最好在 10mm 以上，这样，在斜拉索牵引过程中，螺纹不易碰坏，或发生局部变形。

第七，拉索张拉端被提升至所需高度后，主要由从套筒引出的滑轮组（单门滑轮、2 根丝）牵引进入，此时塔顶主滑轮组应及时调整锚头倾角，使张拉丝杆基本沿套筒轴线方向牵引进入，丝杆前端超出锚垫板一定高度后，即可用开合螺母临时锚固，待安装千斤顶准备张拉。

第八，当张拉端被临时锚固后，即可用卷扬机组滑轮组，将固定端引入锚箱，此状况下，所需牵引力较大，例如挂 All 号索时（索长 216.043m、钢丝重 12962.550kg，立面角度为 38.1999），滑轮组选用两个 6 门 32t 滑轮组，绕 12 路丝（另一种做法是，在张拉端离套筒距离尚远时，先将固定端灌入锚箱，此时牵引力较小，仅用三根丝滑轮组就可，但上端牵引力相应增大很多，实践证明前一种做法更安全可靠）。滑轮组仍通过抱箍与斜拉索连接。为防止抱箍滑移，可在抱箍前加一根套筒，将力传至冷铸锚杯根部。

第九，随着斜拉索长度的不断增加，重力增大，立面角度减小，斜拉索两端的水平分力也越来越大（以 J15 号索为例，总长 264.85m，重 15891.000kg，立面角度 29.942°，根据现场油表读数计算，当固定端已按设计要求锚固好，张拉端锚杯前端距离锚垫板为 9.08m 时，钢绞线所受拉力为 20.08t，已超过卷扬机牵引能力），张拉端仅依靠接长拉杆已不足以减小挂索机的牵引力，此时需在拉杆前加接钢绞线束，用快速千斤顶代替卷扬机实施牵引，如图 1-4-25 所示。

用千斤顶通过钢绞线实施牵引的施工步骤有以下六步：

第一步，机具、材料准备。千斤顶为 KS1200 型，由两个穿心式油缸及两个工具锚组成，额定油压 50～63MPa，排油量 2～10L/min，相应牵引速度为 76～383mm/min，牵引过程为无间歇连接作业。ϕ15.24 钢绞线下料长度 10～15m，每束六根，其中三根为右捻，三根为左捻，左右对称排布。购置与工具锚相匹配的工具夹片，加工钢绞线与张拉丝杆间的连接头，钢绞线与千斤顶之间的连接件。油泵为 YBZ×1.5/63 型电动高压油泵，额定压力 63MPa，配套压力表采用 60MPa 油压表，精度为 0.4 级。

第二步，将钢绞线束穿入千斤顶，并用工具夹片，限位螺母锁定，钢绞线一端伸出前活塞工具锚 30cm 即可，后活塞锚环外另一端，事先做挤压接头，并穿好工作锚环及限位螺母。

第三步，将已连成一体的千斤顶与钢绞线吊入上塔柱内，使钢绞线自由端从相应套筒放出套筒外口，并将千斤顶固定于反力架上。

第四步，当斜拉索张拉端丝杆被提升至适当高度时，于空中将钢绞线与张拉丝杆连接。

第五步，固定端进入锚箱后，即可开始用千斤顶牵引斜拉索。经过几次实地操作，发现几个容易出现问题的环节，并研究了解决办法：在千斤顶工作的初始几个行程中，钢绞线束易发

生扭绞现象，原因有两个：一是斜拉索与钢绞线在制作完成后均有扭应力存在，其中斜拉索的扭转可靠吊点抱箍限制，钢绞线的扭转可通过对称排布左、右捻钢绞线来自行抵消。二是钢绞线受力不匀造成扭绞，解决的办法是，尽量使钢绞线长度一致，并每隔 50cm 用胶布束紧一处，就能保证每根钢绞线基本同时受力。快速顶前活塞回油时，可能出现工具夹片不能自动松开而导致钢绞线在千斤顶内散丝。因此，在张拉开始前，应在工具夹片外表涂润滑油脂，并在千斤顶工作过程中严密注意夹片是否松开，以便及时停机。钢绞线束露于套筒口外的长度宜长不宜短（不少于 4～5m），越长，其端部自由度越大，与张拉丝杆在空中（施工人员于空中实施连接）的连接越容易，如图 1-4-25 所示。

第六步，岸侧边跨合龙后，岸侧斜拉索上桥方案有两种：从江侧前端上桥面，平拖至岸侧再向上牵引；直接从岸侧钢箱梁路缘外侧上桥面。前一种方案在安徽铜陵大桥及黄山太平湖大桥都使用过，缺点是用时较长，还需多台卷扬机接力做桥面牵引。后一种方案首次在南京二桥实施成功，只需将原安装在梁前端的转向架改装在梁外侧，转向架向外挑出，牵引张拉端通过转向架时先让其完成竖直面转向，到达桥面，再使其完成水平转向，转而沿平行于桥轴线的路径向索塔根部牵引，其他环节施工过程则与上述内容相同，实践证明此方案较前一种更省时、高效。

斜拉索的张拉：

斜拉索的最小张拉吨位为 180t，最大张拉吨位为 460t。采取一端张拉，一端锚固的张拉方式，即事先把斜拉索下端冷铸锚锚固在箱梁上，张拉在索塔内进行。根据施工单位现有设备，以及最大张拉力不超过千斤顶容许荷载的 95％的施工规范，张拉千斤顶采用 YDC－500 型和 LS－600 型千斤顶，油压表采用 0.4 级精度表。在索塔内张拉空间足够的情况下，在张拉丝杆上配有精度为 0.5％的 600t 传感器进行检验，保证索力准确。张拉安装如图 1-4-26 所示。

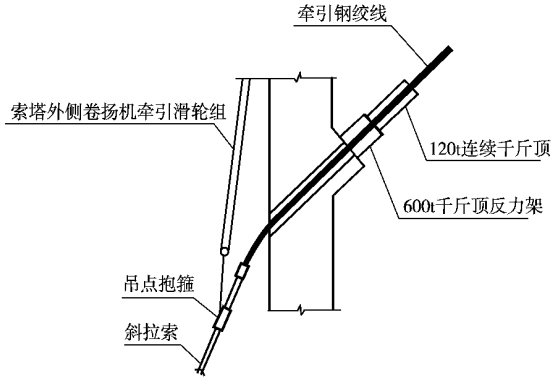


图 1-4-25　千斤顶牵拉斜拉索示意图

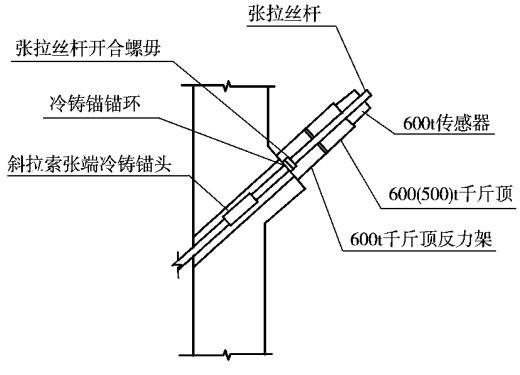


图 1-4-26　斜拉索张拉设备安装示意

张拉前的准备工作。在张拉前千斤顶、油泵、油压表都要到有资质的机构进行标定，并要出具标定书。

千斤顶检验系数：K＝理论计算张拉力/实际张拉力＝（油压表读数×活塞面积）/压力机读数

千斤顶内摩阻：η＝1－（实测张拉力/理论张拉力）×100％＝[1－（压力机读数）/（油压表读数×活塞面积）]×100％

如果检验系数 $K<1.05$ 或内摩阻 $\eta<5\%$ 为合格，可以使用。

根据钢箱梁悬臂端的荷载状态，斜拉索正式张拉分两次。张拉吨位由设计提供。前后两次都必须四根同时对称张拉，以防止索塔承受过大的弯曲应力。在张拉设备安装好以及钢箱梁焊接完成后，进行第一次张拉。为了减少温度、日照对张拉和梁体高程的影响，斜拉索的第二次张拉定在晚上 9:30 以后日出之前进行。采取分级张拉，以每 5t 为一级缓慢进行，并做好张拉记录。

张拉端冷铸锚杯进入斜拉索套筒口前，由于斜拉索因自重下垂，必然使张拉丝杆下缘抵在套筒口上，此时须依靠主吊点滑轮组随时调整高度。使得拉杆始终处于套筒中心，否则拉杆螺纹将被损坏。

在张拉过程中，要不断拧紧斜拉索冷铸锚的锚环，防止千斤顶回油时，斜拉索产生冲击，损坏千斤顶和油泵。同时观察油压表读数以及传感器读数，使两者基本保持一致，如果两者相差较大，应立即停止张拉并分析原因。

(4)斜拉索的临时减振

在钢箱梁的悬拼过程中，斜拉索的风振非常明显，直接影响箱梁悬拼时的控制，因此，施工过程中，在斜拉索下端设置临时减振装置。此方法简单有效，如图 1-4-27 所示。

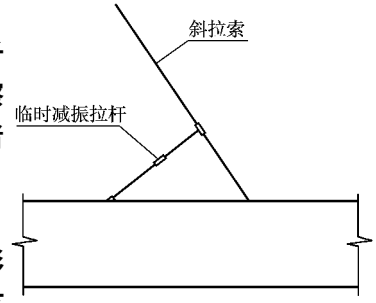


图 1-4-27　斜拉索临时减振安装图

第三节　斜拉索的调索与索力量测

一、斜拉桥的施工控制方法

按照以往的工程实践，对索力和梁面高程的控制有两种方法：一种是“一次到位”；另一种是“逐步到位”。两种方法的最终目的都是力图使梁的高程和内力都符合设计要求。

1. 一次到位法

采用一次到位施工方案，设计上往往采用“倒拆法”确定索力，即以成桥状态为基准，按照与施工步骤相反的顺序进行倒算而获得预定的理想状态。其计算量较大，计算往往与实际状态有一定出入，因此，往往也需进行局部索力再调整，实际上很难做到严格意义上的“一次到位”。同时，采用这种方法要求监控设备较完备。

在进行计算时，实际上是通过倒拆、正装交替计算，确定各施工阶段的安装参数，使结构逐步达到预定的线形和内力。

当斜拉桥采用混凝土主梁时，由于斜拉桥的非线性和混凝土收缩徐变的影响，倒拆和正装计算中，两者会不闭合。这是因为混凝土的徐变与结构的形成过程有密切的关系，原则上倒拆法无法进行徐变计算。为了解决倒拆和正装计算徐变迭代问题，第一轮倒拆计算，不计混凝土的收缩徐变，然后用上次倒拆的结果进行正装计算，逐阶段考虑混凝土收缩和徐变的影响，并将各施工阶段的收缩徐变值存盘，再次进行倒拆计算时，采用上一轮正装计算阶段的混凝土收缩和徐变值，如此反复，直到正装和倒拆的计算结果收敛到容许的精度。

这种方法适宜于主梁刚度较大、梁中有纵向预应力、桥面系质量较小、悬浇挂篮(或悬拼吊架)质量较小的斜拉桥。

2. 逐步到位法

逐步到位法是以主梁合龙为界，合龙前主梁呈双悬臂状态，施工应以主梁高程为准，当梁

自重、挂篮(或吊架)与斜拉索的综合影响对安装面形心产生的弯矩达到平衡状态时,梁转角也就为0,梁端挠度相应亦为0,这时的梁端高程就是设计高程。当梁合龙后,再对已形成的多跨弹性支承连续梁,通过张拉索,将梁预抬高,以抵消桥面系的二期恒载将产生的下挠度。必要时可将混凝土徐变和斜拉桥非线性等影响都在调索预抬高中一并考虑。逐步到位法适用于主梁刚度较小、梁中无纵向预应力、桥面系质量较大、悬浇挂篮(或悬拼吊架)质量较大和主梁采取预制拼装的混凝土主梁斜拉桥。

由于主梁架设过程中的诸多因素的影响,斜拉索的索力和桥面高程与预想的结果往往有一定的变化,所以,目前工程上更多地采用逐步到位法进行斜拉桥的控制。

二、施工控制的理论计算方法

1. 计算中应考虑的因素

采用悬臂法施工的斜拉桥,始终处于内力不断变化的超静定结构状态,不论采用上述哪种分析方法,都应考虑下列影响因素。

(1)挂篮结构形式对计算图式的影响

目前挂篮结构形式主要有前支点式和后支点式两种。其计算图式亦有所不同。

(2)几何非线性影响

随着主梁施工的前进,斜拉索不断增长,倾角不断减小,水平分力(轴力)不断增大,拉索垂度愈来愈大,带来的非线性影响非常显著。

(3)混凝土收缩、徐变的影响

由于各个阶段加载龄期的不同,收缩、徐变的影响更为显著,必须加以考虑。对于预制拼装的主梁收缩和徐变影响另有不同的算法。

(4)温差影响

尤其是夏季施工,日照、骤变温差给索力和桥面高程带来的影响更为突出,因此,理论分析中所取用的温差值对指导施工有重要意义。

(5)地震和风力影响

在施工中应作为特别荷载考虑。

上述的分析方法和应考虑的因素在设计中都应编制专门的程序并通过计算完成。

2. 控制目标

(1)索力

为减少非线性影响,目前斜拉桥设计索力已用到破断拉力的0.40左右。因此,在所有的施工过程中,所发生的最大索力不宜超过设计值。当施工荷载 P_0 特别大时,在临时情况下,经设计单位同意,索力可用到 $0.50T_{max}\sim0.60T_{max}$,但施工荷载移位后,原张拉的索力一般应放松,回到与主梁自重 G_0 相平衡的状态。这一短时间内索力的紧与松是施工进程中的局部调索,应与合龙后的结构调索有所区别。由于斜拉索索力幅度较大,张紧和放松操作容易,所以一般为非主要控制目标。

(2)梁的应力

斜拉桥主梁的计算跨径为斜拉索的间距 a,密索结构中 a 值很小,所以主梁一般可不设纵向预应力。在这种情况下,采用索力一次到位法,梁的施工状态与成桥状态的差异很容易在梁内产生偏离弯矩,所以梁的施工应力往往成为控制目标。

(3)梁面高程

能否符合设计线形是工程验收的主要内容之一，但高程又有以下不同状态的标准：

①合龙前主梁符合设计线形，但桥面系施工后的重力 P_1 使主梁产生挠度 f_1，再经若干年混凝土徐变和斜拉索非线性影响完成后下挠 f_2，合龙后共计下挠（f_1+f_2）。

②合龙前主梁高程预抬高 f_1，浇筑桥面系重力 P_1 后主梁符合设计线形。若干年后再产生下挠 f_2。

③合龙前主梁高程预抬高（f_1+f_2），若干年后主梁下挠，线形方符合设计线形。

总之，三种不同标准将决定工程控制采用不同的理论计算方法。在施工前应由业主和设计单位先确定采用哪种标准后，施工单位才能制定相应的控制方法。

3. 计算方法

（1）刚性支承连续梁法

从施工一直到成桥的整个过程中，通过多次张拉索力，使斜拉桥主梁在恒载状态下的内力与刚性支承连续梁的内力大体接近。

（2）四点（或三点）控制法

此法是通过索力设计，使施工阶段的主梁悬臂端的高程一直保持为成桥状态高程，在其后的 4（或 3）个节点的主梁通过施加预应力，以避免该部分主梁和桥面板出现拉应力。

（3）零弯矩法

设计斜拉索索力的垂直分力与安装梁段预制构件的重力相等，再通过在主梁内施加纵向预应力使得拼装面上的弯矩为零。这种梁段安装法对已拼装的主梁既不传递剪力也不传递弯矩而只传递轴向力，因而理论上后安装的梁段对已架设的结构不产生新的位移，新安装的梁段也没有挠度，其高程即为设计高程。对于现浇主梁，可以斜拉索索力为未知数，对已浇梁端面形心取矩，按 $\sum M_i=0$ 原则求得索力恒载，梁面高程为设计高程。在主梁合龙后，再进行调索，使梁抬高（f_1+f_2）。

（4）内力平衡法

以斜拉索初张力为未知数，各截面特性以及初张力以外的恒载内力和活载内力为已知数，设计合理的斜拉索初张力，以使结构各控制截面在恒载和活载共同作用下，上缘的最大应力和材料容许应力之比等于下缘的最大应力和材料容许应力之比。

三、施 工 控 制

1. 施工管理措施

（1）成立施工监控小组。主持斜拉索索力和主梁梁面高程的工程控制。除设计代表外，应聘请专职的技术人员和固定的施工观测、检查和监理人员。

（2）制定完善的施工技术大纲，严格按设计或施工工艺规定的各项要求施工。

（3）在主梁梁段浇筑或预制工艺中，应保证精度，限制误差。同时对施工荷载也应控制，将主梁恒载和施工荷载对内力和变形的影响减小到最低程度。

（4）按时完成各项施工测试任务，提供的测试数据应准确、可靠，以作为施工控制的依据。

2. 施工控制原则

（1）斜拉桥竣工后的线形应符合设计要求，且梁的应力应在安全范围内，这是施工控制的基本原则。一般在主梁施工阶段以控制高程为主，二期恒载施工后则以控制索力为主。

（2）在施工中，如发现高程和索力误差较大，应暂停施工，查明原因，及时纠正，尽可能使两者均符合要求。

(3)如果主梁刚度较小,主梁的变形对索力的变化比较敏感,则斜拉索张拉时应以高程测量控制为主。如果主梁刚度较大,索力的变化对悬臂端的变化影响有限,那么,施工中可以拉索张拉力进行控制,然后根据高程实测情况对索力作适当调整。此时高程、线形主要是通过混凝土浇筑前放样高程予以调整。

3. 施工测试

(1)目的

施工测试是施工控制的基础和重要组成部分。通过测试所获得的斜拉桥在施工各阶段结构内力、变形以及其他特征量的数据资料,是对斜拉桥实施控制、调整的主要依据,同时也是监测施工、改进设计、确保结构在施工过程中安全的重要手段。

(2)内容

施工控制中的测试主要有主梁及索塔的变形测试、结构各控制截面的应力应变测试、索力大小测试、温度影响测试、挂篮变形测试以及其他一些参变量如混凝土的弹性模量和结构几何尺寸等的测试。

①主梁变形测试是在斜拉桥每一阶段施工中测定每一工况作用下主梁的变形,可根据每一工况作用前后的高程来确定。

②索塔变形测试主要是测定某些关键工况作用前后索塔沿桥轴线方向的位移,对于采用空间索的斜拉桥,有时也需测定横向水平位移。

③应力测试主要是测定某些工况作用前后主梁或索塔内若干控制截面的应力变化,可采用预埋传感元件,通过应力应变仪测试。

④索力测试是测定每一施工阶段内每一工况作用前后斜拉索的索力大小。

⑤温度影响测试主要是测定典型气候条件下全天 24h 内的温度变化对主梁挠度、索塔变形以及索力大小等的影响。

⑥挂篮变形测试是指梁段混凝土浇筑前后挂篮变形的测定,并以此作为立模高程调整的依据之一。

(3)施工控制中的测量

上述索塔、主梁、挂篮变形测试主要是通过测量手段进行的,保证测量数据的准确性,是索塔、主梁、斜拉索施工放样的关键,其误差对结构内力、线形有较大影响。

①测量精度控制系统。全站型电子速测仪可以单机、远程、高精度快速放样或观测,并可选择性地避开施工干扰,是目前斜拉桥施工主要的高精度测量仪具。

施工测量控制网是施工放样和施工中变形测试的基准,为了确保测量精度,一般需要在原有控制网的基础上进行网点加密,并对其进行严密平差及定期复测。高程控制网的两岸必须进行跨河水准校测,以保证两岸高程的统一。高程控制网的布设应与平面控制网的布设同时进行,采用全站仪时放样用的主要平面控制点应纳入高程控制网,统一联测平差。高程控制网的基本网和加密网精度保持一致,其精度根据规范确定。复测精度与建网精度相同。

为保证施工放样或观测的精度和速度,对放样或观测的主要控制点应设强制对中固定观测墩座;对于其他控制点也应尽量设强制对中固定标志杆,以便于精确照准。

采用全站仪可直接由控制点进行三维放样或观测主梁、索塔及索管,可达到很高的精度效果。索塔和主梁上的斜拉索套管定位宜选用同一控制点,以使套管的相对定位精度与该控制点本身误差无关。

②测量时机的选择。设计所提供的每个施工节段的相应桥面高程和其他变形值,一般是

基于某种标准气温下的设计值，而大型斜拉桥往往跨季节、跨昼夜施工。温度变化，特别是日照温差的变化对于斜拉桥结构变形的影响是复杂的，将温差变化所引起的结构变形从实测变形值中分离出来相当困难。因此，应尽量选择温度变化小的时机进行测量，力求将温度、日照对施工控制的影响降低到最小限度。对一些斜拉桥温度影响的测试表明，在气候条件最不利的夏季，凌晨日出之前的气温较均匀，且最接近季节平均气温，是测量的较好时机。

4. 索力调整

(1)根据工程控制的计算，需要通过斜拉索力的施工调整达到控制高程和梁内应力的目的。索力调整根据不同的设计要求，可在梁上或塔上进行，有的塔上不便安装千斤顶，则可在施工脚手架上进行。

在空心塔内进行调索施工时，需在塔内增设施工支架或升降平台，调索设备可通过塔吊、卷扬机、升降平台等运送。H 形带隔板的塔上调整，调索设备可设在塔外。

在梁上调索时，如果斜拉索锚固在箱形梁的箱内，则施工比较方便。如果斜拉索锚固在箱形梁的悬挑翼板或在肋板梁的肋板处，则需要安设吊篮或其他形式的施工支架作工作平台。可利用卷扬机、手拉葫芦等将调索设备吊运到位，千斤顶等设备可用手拉葫芦等工具定位、固定。

(2)调索一般用穿心式千斤顶进行。当千斤顶及其撑架安装到位后，用张拉杆与斜拉索锚头的内丝孔旋接。需要增加索力时，用千斤顶顶动张拉杆将斜拉索牵向索管口；需要放松索力时，受力前预先使千斤顶活塞伸出一定量，然后再用千斤顶顶动张拉杆，使斜拉索锚头上的锚固螺母即锚环刚好能够松动。将锚环松开后，使千斤顶卸荷，将斜拉索放出索管口。索力调整如图 1-4-28a)所示。

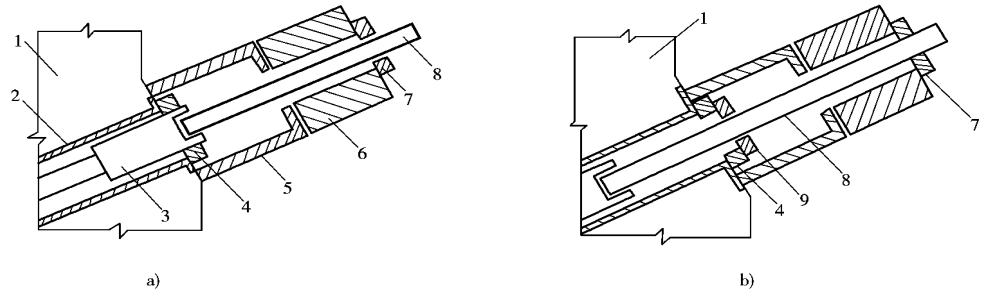


图 1-4-28　索力调整张拉示意图

1-索塔；2-索管；3-拉索锚头；4-锚环；5-撑架；6-穿心式千斤顶；7-张拉杆锚固螺栓；8-张拉杆；9-张拉杆前螺母

有些情况下，当斜拉索锚头还没有被牵出索管就已开始索力的张拉调整，此时需要在斜拉索锚环上增加一张拉杆锚固螺母即张拉杆前螺母。该螺母可由两半边组成，便于组装和拆卸。张拉杆前螺母采用此结构形式，是因为此种张拉方式的张拉杆在牵索过程中，在塔外就被接在斜拉索锚头上，与斜拉索一道被牵进索管，采用组装的办法，从千斤顶撑架侧将张拉杆螺母上到张拉杆上。千斤顶分行程逐步张拉时，用张拉杆前螺母临时将斜拉索上端锚固，如图 1-4-28b)所示。

(3)张拉吨位的控制是工程控制的关键，对一般千斤顶的张拉或放松操作是直接按油泵上油压表读数控制，索力的检测只作校核控制，一般油压表读数更为灵敏精确。油压表盘刻度不宜过大，采用 0.4 级左右的小分度表为宜，以提高读数精度。进行索力调整前，应将千斤顶及

配套使用的油压表进行标定，标定工作应由有资质证书的专业计量单位进行。标定的加荷过程必须多次重复，对标定数据要按数理统计要求和国家标准，将各次试验测得的油表读数及相应的张拉力根据数理统计最小二乘法原理进行回归，得出调索控制的直线公式。

$$Y=aX+b \tag{1-4-7}$$

式中：Y——油表读数；

X——张拉力；

a、b——由统计计算得出的常数。

调索前，应将设计张拉吨位对应的油表读数根据上式确定，以便在调索时直接使用。

四、调 索 施 工

如前所述，斜拉桥的施工控制问题实质上是斜拉索的索力控制，现将调索的施工方法分述如下：

1. 索力的检测及校核

(1)检测及校核的目的

调索的张拉力仅按油泵压力表控制是不完善的，因油压表本身的精度不够高，同时，油压表也易发生故障。此外千斤顶的内摩阻力较难准确估计，它是随着油封磨损程度和张拉力的大小而变化的量。因此，一旦油表或千斤顶工作状况发生变化，就需要采用其他手段检测校核张拉力。

工程控制要求经常掌握拉索在各施工阶段的受力状态，因而需要有另外的专门检测索力的方法，这种情况下的索力检测就是上述的索力测试。

在调索张拉过程中，由油压表读数直接指示千斤顶的操作，并与检测和校核手段结合以共同控制斜拉索的索力状况，以此对各施工阶段索力状态的检测来确定各阶段需要调整的索力值。

(2)索力检测方法

①电测法

这是运用电测应变测量原理，通过贴有电阻应变片的张拉杆或压力传感器，将索力的大小转变为电信号，并由电阻应变仪或电子秤显示的方法。

与用油表控制索力的方法相比较，此法的精度高(可测出满量程 1/1000 的变化)便于集中

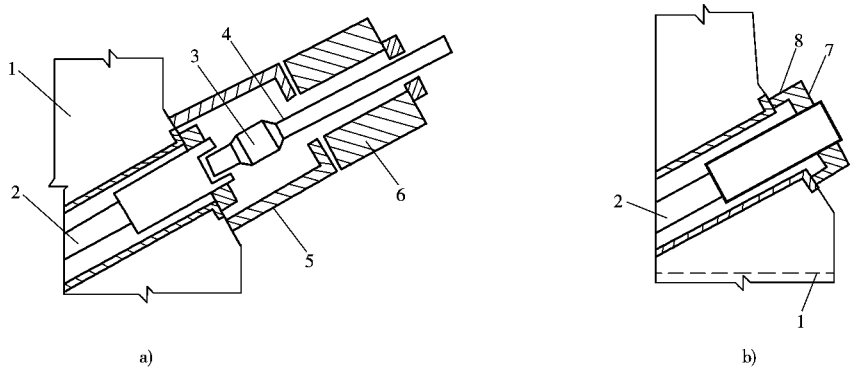


图 1-4-29　索力电测法示意图

1-索塔；2-拉索；3-应变片保护罩；4-张拉杆；5-撑架；6-穿心式千斤顶；7-拉索锚环；8-压力传感器

检测，且可长期观测。图 1-4-29a)是在穿心式千斤顶的张拉杆上贴应变片测量索力的示意图，应变片按设计贴在张拉杆上，并接有温度补偿和零点补偿电阻。张拉杆上贴有应变片的测力段外面加有保护罩，应变片的引出线沿着张拉杆表面铣出的槽通向拉杆尾部，在此通过电缆接头与应变仪或电子秤相连，当张拉杆受力时，应变片输出的电信号由电子秤或电阻应变仪读出。这种测力系统适用于张拉时的索力控制，具有较高精度，使用前应进行标定，标定误差应小于 1.5%。

图 1-4-29b)所示的是利用贴有应变片的压力传感器，进行长期索力观测的示意图。传感器放在锚具和索孔垫板之间，其上的贴片也是按设计进行的，传感器在受压后就输出电讯号，于是就可在配套的仪表上读出力的量值。

如仅检测张拉杆的张拉力，也可将传感器置于千斤顶尾端面和千斤顶后螺母之间。

对于一些试验桥以及比较重要的大型桥梁施工期间的索力监测，图 1-4-29b)方式简便易行，精确可靠。根据需要，可在某几根特别重要的拉索锚下布置传感器，也可在每只锚配置一个。当进行索力长期观测时，传感器以安放在索塔锚具下为好，因为这样便于导线集中沿塔下行，汇集于塔根部接线箱内，日后一旦需要测索力，就可以将接线箱打开，接上电子秤，通过分线开关的切换，在极短的时间内，将全桥各索索力精确测出。

压力传感器在使用前应进行标定，其误差应不大于 1.5%。

应力片电测法的精度虽高，但成本也高，长期使用维护困难。

②频率法

索的拉力和其自振频率之间存在一定的关系，对于两端铰支的柔性索，索的拉力为：

$$T=\frac{4WL^2f_n^2}{n^2g} \tag{1-4-8}$$

式中：T——索的拉力；

W——单位长度索的质量；

L——索的计算长度

f_n——第 n 阶自振频率；

n——振动阶数；

g——重力加速度。

实际上，即使是柔性斜拉索，也并非完全无抗弯刚度。因此，对两端铰接的刚性索的索拉力为：

$$T=\frac{4WL^2f_n^2}{n^2g}-\frac{n^2EI\pi^2}{L^2} \tag{1-4-9}$$

式中：EI——索的抗弯刚度。

其余符号意义同上。

根据式(1-4-8)或式(1-4-9)，测出斜拉索的振动频率就可得到其索力值。目前有两种方式可测得斜拉索的振动频率。一种是用一个周期仪绑在拉索上，再对拉索施加人力激振，当它形成稳定的一阶正弦振动后，测出其振动周期。为消除按频率推算索力过程中其他因素的影响，可在预拉台座中对每一种规格和长度的拉索，在指定的索力范围内，逐级测定其频率和索力的关系，在实桥测定中，根据实测的频率，对照相应的索力和频率相互关系，即可求得索力。但这种方式因体力、经验和技术等原因，不一定每人都能将索激起理想的一阶正弦波，因此，实际的测试结果总存在着一定的测量误差，有时甚至无法测得结果。

另一种是不用人力激振，而用精密的拾振器将微弱的时刻发生着的拉索环境随机振动信号接受下来，通过频谱分析，根据功率谱图上的峰值，判定拉索的各阶频率，频率既得，即可计算索力。对于大跨度和特大跨度斜拉桥，最好采用此方式。

通常拉索的端点并未作铰接处理，在靠近端点处常安装减振器，而拉索自身又或多或少具有一定的抗弯刚度。因此，拉索的计算长度 L 将稍短于拉索的实际长度 L_0，需适当修正，应视拉索和锚具的构造及减振器安装的位置而定。

式(1-4-9)中的 $\frac{n^2EI\pi^2}{L^2}$ 表示为拉索抗弯刚度对索力的修正。频率为低阶时，这一修正值很小，百米以上的长索，此值就更小，但若在计算索力时采用高阶频率，修正值将急剧增大。

因此，用频率法测定索力时，首先要精确测定频率，特别是低阶频率，能测出一阶频率更好；其次，要准确设定拉索的计算长度。

频率法相对于电测法是一种经济、简便的索力检测方法，其测量精度也可满足工程控制的需要。在施工调索时常用周期仪来校核，在合龙后的结构调索中一般采用电测法测出同一时间的各索力。

(3)拉索延伸量的校核方法

调整索力的过程中，根据索力的增量和延伸量的对应关系，可以校核千斤顶施力的正确与否。拉索的延伸量由两部分组成：拉索的弹性延伸量 ΔL_e 和拉索的垂度修正值 ΔL_f。

当索中应力由 σ_1 增至 σ_2 时，分别计算 σ_1 和 σ_2 时的 ΔL_e 和 ΔL_f：

$$(\Delta L_e)_1 = L_0 \frac{\sigma_1}{E} \tag{1-4-10}$$

$$(\Delta L_f)_1 = \frac{W^2 L_x^{\,2} L_0}{24 T_1^2} \tag{1-4-11}$$

$$(\Delta L_e)_2 = L_0 \frac{\sigma_2}{E} \tag{1-4-12}$$

$$(\Delta L_f)_2 = \frac{W^2 L_x^{\,2} L_0}{24 T_2^{\,2}} \tag{1-4-13}$$

式中：σ_1、σ_2——调索前后索的应力；

E——索的弹性模量；

T_1、T_2——调索前后索力；

L_0——上、下两个索孔出口处锚固中心的空间距离；

L_x——L_0 的水平投影长；

W——拉索每单位长度质量。

则与索力增量对应的延伸量为

$$\Delta L = (\Delta L_e)_2 - (\Delta L_e)_1 + (\Delta L_f)_1 - (\Delta L_f)_2 \tag{1-4-14}$$

实际上，张拉时索力增加，还会使桥面抬高，索塔也向受力一方倾斜，这样就会使以张拉端索孔端面为基准量出的拉索延伸量有所增大，其影响值需另作计算。

索力延伸量计算图式如图 1-4-30 所示。

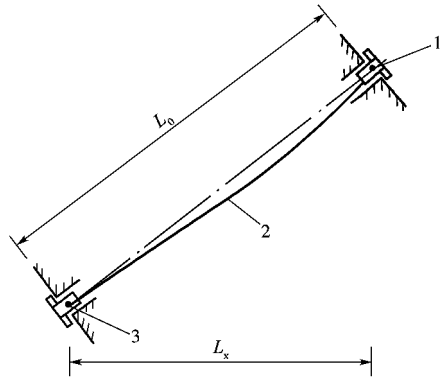


图 1-4-30　索力延伸量计算图式

1-上锚固中心；2-拉索中心线；3-下锚固中心

2. 调索设备及检测仪器

(1)调索主要设备

①千斤顶。根据索力调整的实际需要，主要是张拉力大小的选用。

②张拉杆、撑架及锚固螺母。张拉杆、千斤顶撑架及张拉杆锚固螺母等需根据施工的受力和使用功能要求，自行或与有关专业厂家配合进行实用性强的设计和制作。

③电动油泵及油压表。电动油泵及油压表在专业厂家购买。选用时要注意油泵的油压大小和泵油功率能否满足配套千斤顶的张拉力需要，油压表的精度最好在0.4级左右。

④手拉葫芦。用作千斤顶的定位、固定及塔内相邻索位的千斤顶转移。

⑤卷扬机。用作塔内千斤顶设备的运输工具

⑥塔吊。用作塔内千斤顶设备的运输工具。

⑦塔内提升系统。为方便施工，塔内可设置升降平台，以提升系统为其动力。以卷扬机为动力的提升系统是一种简便适用的方法。

(2)索力检测仪器

①带筒式传感器的测力仪器。它是运用应变片电测技术的一种测力仪器，是将筒式传感器放在千斤顶与张拉杆锚固螺母之间以测定调索的索力，上海泖港大桥使用过这种测力仪器。

②孔幅式传感器的测力仪器。孔幅式传感器是在筒式传感器基础上的发展，其高度较低，可直接垫在拉索锚具下对索力进行长期检测。上海恒丰北路立交桥和重庆石门大桥使用了这种仪器。

③数字直读式测力仪。这是一种运用应变片电测技术和数字显示技术，实现拉索的索力值直接数字显示的仪器。其传感器是专门设计的，可以和千斤顶组装在一起，使用非常方便，曾在广东九江大桥使用。

④钢索测力仪。钢索测力仪由传感器和接受仪组成，是按频率法测定索力的仪器。传感器附着在钢索上，以人力激振方式测定钢索振动频率。

⑤环境随机振动法索力仪。一种运用频率法测定索力的仪器。与钢索测力仪不同的是，不需对索进行人力激振，而是利用环境随机振动作为振源，索的振动信号由加速度传感器感受后转变成电信号，电信号由电荷放大器放大，再在计算机中储存，而后再分析求算频率。广东九江大桥运营中调索开始使用这种仪器。上海杨浦大桥亦曾使用。

3. 索力调整施工

(1)步骤

①将张拉千斤顶和配套油泵进行标定。对预计的调整值划分级次，根据标定得出的张拉值和油表读数之间的直线公式(1-4-7)，计算并列出每级张拉值和相应的油表读数。

②对索力检测仪器进行标定。

③计算各级调整值并列出相应的延伸量。

④做好索力检测和其他各种观测的准备工作。

⑤将张拉工具、设备一一就位。可先将千斤顶撑架用手拉葫芦等固定在斜拉索锚固面上，然后将千斤顶用螺栓连接支撑在撑架上；将张拉杆穿过千斤顶和撑架，旋接在斜拉索锚头端，再将张拉杆上的后螺母从张拉杆尾端旋转穿进；将千斤顶与油泵用油管接好，开动油泵，使千斤顶活塞空升少许，如调索要求降低索力，可根据情况多升一定量；接着将后螺母旋至与活塞接触紧密。如调索是在斜拉索锚头还未被牵出锚固面的情况下进行，则上述过程已在牵索过程完成。如索力检测采用测量张拉杆拉力的方式，则应在张拉杆后螺母间安装穿心式压力传感器测量张拉力，需先将传感器从张拉杆后端插入，再将张拉杆后螺母旋入。

⑥按预定级次的相应张拉力，通过电动油泵进油或回油逐级调整索力。如果是降低索力，则先进油拉动斜拉索，使锚环能够松动，在旋开锚环后可回油使斜拉索索力降低。在调索过程中，如千斤顶达到行程允许伸长量，即可将斜拉索锚头的锚环旋紧，使其临时支承于锚固支承面上，这时千斤顶可回油并进行下一行程的张拉。如果调索是在斜拉索锚头还未牵出其锚固面的情况下进行，则临时锚固由叠撑在锚环上的张拉杆前螺母即两半边螺母承担临时锚固。

调索过程中，应以检测、校核数据配合油表读数共同控制张拉力，并通过观测结果防止不正常情况的发展。

(2)索力调整注意事项

①千斤顶和油泵等张拉机具应由专人使用和管理，并应经常维护，定期检验。对于下列情况，均应对千斤顶和油泵配套进行重新标定：千斤顶或油泵出厂初次使用；千斤顶使用超过 6 个月或 200 次；千斤顶或油泵在使用过程中出现不正常现象；千斤顶或油泵经过检修；千斤顶和油泵重新配对。

②对千斤顶和油泵进行编号，以免标定结果用错。

③斜拉索的索力调整应由专业人员进行，并须经设计部门同意。

④索力调整前应将锚头和锚固锚环配对并检查其质量。

⑤索力调整前应将斜拉索锚固面、各个张拉受力支承面及锚头、锚环、张拉杆、张拉杆锚固螺母等丝齿内的杂物逐一清除。

⑥锚环、张拉杆螺母等各自的旋紧程度要一致，以免斜拉索、张拉杆在索力调整过程中受力不匀。

⑦斜拉索、撑架、千斤顶、张拉杆在调索施力过程中位置要居中，均匀；以免拉索、张拉杆受力不均匀。

⑧索力调整过程中应注意保护拉索不受伤害。

⑨索力调整过程中，必须同时进行梁段和索塔变位观测并与设计变位值校核。超过设计规定范围或出现其他不正常情况时，应停工，检查原因，并与设计单位研讨，采用适当方法进行修正。

⑩调索过程中要密切注意油泵的压力表值，如遇压力突升应及时关机，查明原因并解决后才能继续工作。

五、对温度影响的考虑

目前，温度对斜拉桥工程控制的影响很难精确地描述。

在大型斜拉桥的施工控制中，温度影响可以分为两种：一种是昼夜温差的影响；另一种是季节温差的影响。无论是昼夜温差还是季节温差对斜拉桥主梁高程控制均有较大影响。

昼夜温差的影响一般在索力和高程控制中多采取回避的做法，即对确定立模或接装高程和斜拉索张拉力这两个对高程和索力起控制作用的施工工序，均要求在温度较均匀的凌晨日出前进行。但遇连续高温的天气情况，由于凌晨的温度仍难均匀，温度的影响难以完全避免，在此情况下，宜采用立模高程的修正公式来减少日照温差的影响。

季节温差的影响，应设定一个标准温度，将施工过程中实际季节温差对结构的影响在施工控制计算中考虑。

第四节　斜拉索的更换及调索

一、拉索更换及营运状态下的调索

更换拉索的原因：斜拉桥的拉索和锚固由于下列原因往往易于引起损伤，为此务必定期养护检查并予记录，发现任一根或多根失去（或可能失去）其技术功能，不能满足设计和使用要求时，应及时对其更换。

（1）腐蚀。由于钢索与周围介质发生电化学作用，造成氧化还原反应，使拉索及锚固系统腐蚀，以致破坏。

（2）疲劳。由于拉索长期处于高应力状态，遭腐蚀后拉索因钢丝承受的拉应力更加速了锈蚀过程，以至失去抗疲劳的能力。

（3）振动。由于拉索处于空气中，在风、雨、气流等的影响下，极大地危害拉索的抗疲劳性能。

（4）活载。由于活载的作用，拉索应力变化大，索梁振动加剧，从而大大加速钢索防腐层的破坏，影响防腐体系的完整，加剧拉索的腐蚀。

（5）温度。由于在高温下注浆，热胀冷缩，使得聚乙烯管容易破裂，导致拉索防护层出现裂缝，或在注浆时压力过大导致聚乙烯管破裂。气象温差的反复剧变亦使拉索防护层老化和破损。

（6）蠕变。由于蠕变拉索无法维持原有长度的应力。

（7）徐变。由于混凝土的徐变和拉索松弛的发展，使主梁发生严重下挠。

（8）其他。运输途中的弯折、施工安装过程中造成的切口、划痕、撞击及磨损等。

对上述情况下的换索工作，一般在工程验收时应予考虑，通车若干年后，养护部门应该根据质检情况提出换索的报告。

二、斜拉索的更换

1. 拉索卸载

通过观察拉索松弛、疲劳损伤状况并经索力的有效检测确认该拉索应更换后，组织人员进场，准备好必要的机械设备和检测仪器，精密测量桥面的高程及塔顶的偏斜，搭设好必要的工作平台。

已封的索端锚头，须先凿出，并认真清理干净，依尺寸加工制作好拉索卸载用的反力架及拉杆等，检修标定油泵、千斤顶等。

准备工作完成后，即开始对旧索进行卸载，此时注意加油应缓慢，并认真计算好加载读数，只需达到锚杯能转动就行，不可加力过大。

锚杯卸掉后，再缓慢松卸千斤顶并配合用吊车等设备将旧索放下卸除，具体操作见本章第二节斜拉索的安装。同时在加油、回油卸载过程中，密切观察桥面高程及塔柱偏移量的变化，并做好相邻拉索的索力测定，以提供可靠数据进行分析。

2. 换索

在选择换索时，新拉索必须符合设计的技术标准和性能要求，特别是其抗疲劳性能和抗腐蚀性能。

旧拉索卸下后需对其进行进一步的研究取证，并取得准确的拉索破坏数据，以进一步确认旧索换新索的技术标准、结构标准和防腐措施。

新索安装的方法的具体内容见本章第二节、第三节。

所换新索必须进行严格精确的张拉，并对施工控制的数据及时反馈，及时调整，只有当新的拉索张紧后，才能卸掉下一根旧拉索。在整个张拉调控过程中要随时测定索力变化情况以及桥面高程变化和索塔偏移量，对邻索的索力和高程进行跟踪测定，并根据所测定的最新数据，进行重新计算和调整。

3. 换索过程中的注意事项

在换索全过程中，任何一个环节、任何一个步骤都必须严格把关，严格控制，确保质量与安全。

(1)在旧索卸下及新拉索安装过程中，应考虑在通车条件下，更换任何一根拉索的方案，不具备条件时可关闭交通；另外，换索过程中，要注意保持原桥体结构的应力状态，建立可靠的监视系统，利用计算机详细计算恒载情况、轴向力等结构受力状况，对出现的变形、高程变化、索塔位移等进行连续监测和修正。

(2)在新索张拉及索力调整中，注意逐级稳步地加载，并随时监测高程及索力，及时计算和调整张拉读数。张拉及调整索力后，移走施工现场所有沉重的临时设备后，再对桥的线形作测试，并作最后的调整，以达到设计要求。

(3)换索后的全面质量评估。换索以后，需对大桥进行一次全面鉴定。对换索后的拉索状况，索力以及全桥其他索索力变化、桥面高程变化、索塔偏移以及换索后进行分析评估，经专家认证鉴定后，方可将换索锚头封固。

三、营运状态下的调索

实践表明，混凝土收缩、徐变和斜拉索的非线性影响，至今尚无精确预计方法，所以斜拉桥主梁线形(高程)难以确切设定。为此，宜在营运状态下采用调索解决。塔柱设计时应考虑塔上的调索操作。

1. 调索的主要原因

(1)合龙后主梁挠度 f 接近或大于 $L/1000$。

(2)斜拉索振动过大，特别是在某种风速下，风振十分明显。

(3)复测索力达不到设计索力，误差超过 5%。

(4)塔柱出现倾斜，塔顶水平位移大于 $L/2000$。

2. 调索前的准备工作

(1)复测所有的斜拉索索力，比较塔柱两侧总索力 $\sum T$ 的水平投影 $\sum H$ 和垂直投影 $\sum V$ 的大小以及与通车前索力的差别。

(2)复测主梁桥面高程值，与合龙后和桥面系完成后的高程相比较，绘出通车后的挠度图。

(3)将上述检测结果进行计算分析，提出自塔柱向外依次增加不同索力后梁内力应力和上挠度值，经比较后初步确定“调索”方案。

(4)在塔柱上安装吊升千斤顶的设施。如果不是空心塔和 H 形带水平隔板的塔则视情况要封闭交通，搭设高塔柱调索脚手架。

(5)召集有经验的起重工、预应力张拉工进行培训。熟悉千斤顶的吊升、安装、张拉索力测定等各项操作，检查各项安全施工的措施。

3. 调索方法

(1)首先分别单独将个别索力不够的斜拉索调至接近原设计值。此项工作既可积累调索经验,又能试验调索效果。紧索后可明显减小风振。

(2)自塔柱旁第一对索开始,依次将每对斜拉索增加相同的索力(设计索力的 5%～10%)。在 $L/4$ 跨前,梁的挠度变化极小,张紧索力主要用于改变梁在根部的转角 θ,储蓄能量。

(3)从 $L/4$ 至跨中,随着索力的增加,主梁的挠度逐渐变化明显。将每天调整后的索力测值输入计算机,并复查与理论计算的差异。

(4)如上抬量大于计算值,可以适当减少下一步调索量;反之,可以适当增加调索量。

(5)调索一般先按每索通加(或减)相同索力进行,然后根据实测索力和挠度结果,通过计算再对个别索另行调整。

4. 调索的注意事项及效果

(1)调索要求“均匀、对称、分次、循环”施工。纵向对称可防止塔柱偏移,横向对称可防止梁扭转。如果梁面横向有四对斜拉索时,当索力不大时可以允许一索不对称施工。对单索面索力不超过 20010kN 级时,则要求尽量对称施工。

(2)调索一般采用如不中断交通亦应禁止重车通行,并注意防止高空掉物伤人。

(3)调索一般采用如下三种控制目标:索力控制、挠度控制和索力与挠度双控。调索后主梁高程恢复到原合龙状态,使桥面线形流畅,索力均匀,使结构也能处于较佳工作状态,基本消除徐变、非线性影响,使索力、主梁应力、索塔应力都处于安全的工作范围内。

参 考 文 献

[1] 林元培. 斜拉桥. 北京:人民交通出版社,1994.

[2] 刘士林等. 斜拉桥. 北京:人民交通出版社,2002.

[3] 交通部第一公路工程总公司. 桥涵. 北京:人民交通出版社,2000.

[4] 李文琪. 郧阳汉江公路大桥主梁及斜拉索施工. 桥梁建设. 1994(1).

[5] 甘洪等. 宜宾金沙江中坝大桥主梁施工技术探讨. 2003 年全国桥梁学术会议论文集. 北京:人民交通出版社,2003.

[6] 中国公路学会桥梁与结构工程学会. 中国公路学会桥梁与结构工程学会 2002 年全国桥梁学术会议论文集. 北京:人民交通出版社,2002.

[7] 中国公路学会桥梁与结构工程学会. 中国公路学会桥梁与结构工程学会 2003 年全国桥梁学术会议论文集. 北京:人民交通出版社,2003.

[8] 中国公路学会桥梁与结构工程学会. 中国公路学会桥梁与结构工程学会 2004 年全国桥梁学术会议论文集. 北京:人民交通出版社,2004.

[9] 中国公路学会桥梁与结构工程学会. 中国公路学会桥梁与结构工程学会 2005 年全国桥梁学术会议论文集. 北京:人民交通出版社,2005.

第一章 悬索桥概述

DIYIZHANG

第一节　悬索桥的发展简况

悬索桥是以悬吊支撑于索塔、锚固于锚碇(边跨加劲梁)的缆索受拉为主要承重构件的桥式,其受力如图 2-1-1 所示。除了主缆、索塔、锚碇(自锚式悬索桥不需要),悬索桥还包括吊索(杆)、加劲梁和桥面结构等。一般来说,当桥跨大于 600m 或更大时,采用悬索桥往往较其他桥式具有较强的竞争力。这是因为高强钢丝组成的主缆受拉最能发挥其材料性能因而较经济,而且其悬链线的曲线形状也能给人以舒缓柔和的美感。

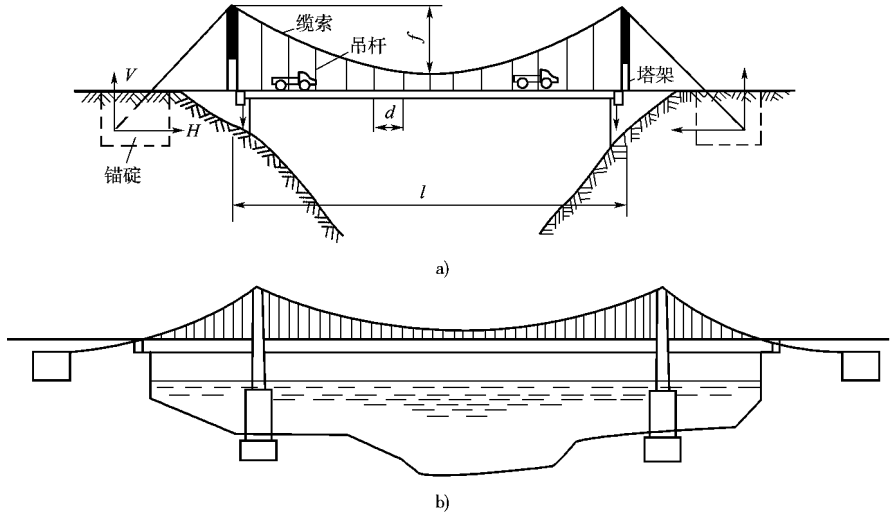


图 2-1-1　悬索桥受力示意图

一、中国古代悬索桥的发展简况

悬索桥的发展历史悠久。据记载,我国远在公元 250 多年前,就出现了竹索桥,主要用于

人行。在公元前 50 年就建成了长达百米的铁索桥。而云南的兰津铁索桥的修建，由于被西方传教士著书出版，并从此使悬索桥传入西方。

二、国外悬索桥的发展简况

国外晚于中国一千多年后开始修建悬索桥，随着设计理论和制造、施工技术的发展和提高，从最初的跨度 21.34m 的倜氏桥，到 19 世纪中叶发展到跨度 308m 的 Wheeling 悬索桥。

进入 20 世纪以来，随着西方和日本工业的蓬勃发展，悬索桥的设计理论、制造工艺和施工技术等方面在国外获得了长足进展。其主要进展如表 2-1-1 所列。

20 世纪国外悬索桥的发展简况 表 2-1-1

国家	桥名	建成时间	跨度（m）	加劲梁				主塔		主缆		
				形式	高度（m）	宽度（m）	体系	类型	高度（m）	缆径	垂跨比	成缆
美国	乔治华盛顿桥	1931	186＋1067＋186	桁梁	12.8	32.3	三跨双铰	钢	170	2φ914	1/10.8	AS
美国	金门大桥	1937	343＋1280＋343	桁梁	7.62	27.42	三跨双铰	钢	210	924	1/8.94	AS
美国	麦基纳克桥	1957	549＋1158＋549	桁梁	11.58	20.73	三跨双铰	钢	157	622	1/10.8	AS
英国	福斯桥	1964	409＋1006＋409	桁梁	8.37	23.77	三跨双铰	钢	149	603	1/10.5	AS
美国	维拉扎诺桥	1964	370＋1298＋370	桁梁	7.35	30.63	三跨双铰	钢	207	2φ899	1/11.1	AS
英国	塞文桥	1966	305＋988＋305	钢箱	3.05	22.86	三跨双铰	钢	122	483	1/12	AS
葡萄牙	4月25日桥	1966	483＋1013＋483	桁梁	10.65	21	三跨双铰	钢	181	586	1/9.5	AS
土耳其	博斯普鲁斯一桥	1973	231＋1074＋255	钢箱	3.0	28.0	单跨双铰	钢	165	600	1/11.8	AS
英国	恒比尔桥	1981	530＋1410＋280	钢箱	4.65	22.0	三跨双铰	混凝土	155	684	1/12	AS

续上表

国家	桥名	建成时间	跨度（m）	加劲梁				主塔		主缆		
				形式	高度（m）	宽度（m）	体系	类型	高度（m）	缆径	垂跨比	成缆
土耳其	博斯普鲁斯二桥	1988	210＋1090＋210	钢箱	3.0	34.0	单跨双铰	钢	110	680	1/12	AS
日本	下津井大桥	1988	130＋940＋130	钢箱	3.05	30.0	单跨伸臂	钢	137	956	1/10	AS
	南备赞大桥	1988	274＋1100＋274	桁梁	13.0	30.0	三跨连续	钢	181	1070	1/11	PWS
瑞典	高海岸桥	1997	317.5＋1210＋287.5	钢箱	4.0	22.0	三跨连续	混凝土	180	640	1/9.5	AS
日本	北备赞大桥	1998	274＋990＋274	桁梁	13.0	30.0	三跨连续	钢	170	1006	1/11	AS
丹麦	大贝尔特东桥	1998	535＋1624＋535	钢箱	4.0	31.0	三跨连续	混凝土	254	827	1/9	AS
日本	明石海峡大桥	1998	960＋1991＋960	桁梁	14.0	35.5	三跨双铰	钢	297	1120	1/10	PWS
	来岛二桥	1999	250＋1020＋250	箱梁	4.3	32.0	两跨连续	钢	173			PWS
	来岛三桥	1999	260＋1030＋260	箱梁	4.3	32.0	单跨双铰	钢	184			PWS

从表中可以看出，国外这一时期的悬索桥修建技术产生了质的飞跃。欧洲、美洲和日本等地区和国家相互学习与借鉴，促进了悬索桥修建的技术进步，从一般的人行和马车通行桥，发展到满足汽车甚至火车通行的桥；从中小跨度发展到跨度1000m以上甚至逼近2000m的桥；从较小的宽度发展到超过40m宽度的桥；从单一的公路桥发展到公铁两用桥；从最初的钢板梁作为加劲梁发展到采用抗风性能较好的钢桁梁和扁平流线型钢箱梁作为加劲梁。

国外悬索桥的这种飞速发展折射的是西方多国和日本在这一时期工业的飞速发展和科技的巨大进步。正是由于这种飞速发展，对交通提出了更高的要求，使大跨悬索桥的修建势在必行；正是由于这种飞速发展，促进了钢材、水泥等建桥材料性能的显著提高，以及大型机械设备

的出现，为大跨度悬索桥的修建奠定了物质基础；正是由于这种飞速发展，使大跨度悬索桥的设计理论研究、工艺实验研究和修建有了经济基础。

三、中国近年来的悬索桥发展概况

1938年，中国湖南建成第一座公路悬索桥，此后一段时间由于经济和技术等方面的限制，修建的70多座悬索桥跨度都比较小、结构也比较简单。近十多年以来，随着国家经济的发展，国力的显著增强，采取学习、引进、消化、吸收，以及研究改进的方式，使我国在短短的十多年时间内，一跃成为世界的桥梁大国，并且逐渐向世界强国的方向努力。国内近年来修建的中大跨度悬索桥，如表2-1-2所列。

中国近年来修建的中、大跨度悬索桥一览表　　表2-1-2

桥名	建成时间	跨度（m）	加劲梁				主塔		主缆		
			形式	高度（m）	宽度（m）	体系	类型	高度（m）	缆径（mm）	垂跨比	成缆
汕头海湾大桥	1995	154＋452＋154	混凝土箱	2.2	24.2	三跨双铰	混凝土	95.1	550	1/10	PWS
西陵长江大桥	1996	225＋900＋225	钢箱	3.0	20.6	单跨双铰	混凝土	120	750	1/10.5	PWS
虎门大桥	1997	302＋888＋348.5	钢箱	3.012	35.6	单跨双铰	混凝土	147.6	687.2	1/10.5	PWS
香港青马大桥	1998	355＋1377＋300	钢箱	71.7	41.0	两跨连续	混凝土	206	1100	1/11	AS
江阴长江大桥	1999	320＋1385＋295	钢箱	3.0	33.1	单跨双铰	混凝土	197	840	1/10.5	PWS
海沧大桥	1999	230＋648＋230	钢箱	3.0	36.6	三跨连续	混凝土	128	563	1/10.5	PWS
宜昌长江大桥	2001	246＋960＋246	钢箱	3.0	30.0	单跨双铰	混凝土	112.4	655	1/10	PWS
润扬长江大桥	2005	470＋1490＋470	钢箱	3.0	38.7	单跨双铰	混凝土	207.2	906	1/10	PWS

我国大跨度悬索桥发展的基本历程是：

初期即20世纪80年代，随着国家推行改革开放政策，中国桥梁界在逐渐发展斜拉桥、连续梁桥的同时，开始了解国外大跨度悬索桥的技术发展动态，公路、铁路行业都陆续派研修生到有关国家学习包括大跨度悬索桥在内的桥梁设计、施工技术，为日后的发展奠定了人才和技术基础。

中期即20世纪90年代，随着国内更大跨度桥梁建设的需要和经济实力的提高，开始规划、研究修建大跨度悬索桥。而这一时期修建的中、大跨度悬索桥，虽然在某些方面有一定的创新，但多数桥梁从设计计算、修建方案、技术工艺、机械设备等都还是以模仿、学习国外的做法和经验为主，有的还引进了国外的承包商和专用技术及设备。而这是任何一个国家都必须走的路。

近期即本世纪以来，随着中、大跨度悬索桥的大量修建，设计和施工经验的积累，机械设备性能的提高，已逐渐从学习模仿阶段向自主创新阶段过渡，在悬索桥的设计计算、结构构造、制

造和施工工艺、机械设备等方面都有了不同程度的改进和发展，甚至拥有了一定的自主知识产权，并开始注重工程经济技术指标、质量和美学。中国大跨度悬索桥将迎来一个飞跃性的自主发展阶段。

悬索桥的世界最大跨度是1991m（日本的明石海峡大桥），如图2-1-2所示。我国已建成的悬索桥最大跨度是1490m（润扬长江大桥南汊悬索桥），如图2-1-3所示。已列入规划的香港十号干线的青龙大桥主跨将达1418m，其效果图如图2-1-4所示。其设计采用第三代流线型钢梁作为加劲梁，在结构设计上有一定的创新和突破，将会有显著的经济效益。修建中的舟山连岛工程西堠门大桥主跨为1650m，图2-1-5为其预想图。

图2-1-2　日本明石海峡大桥

图2-1-3　润扬长江大桥

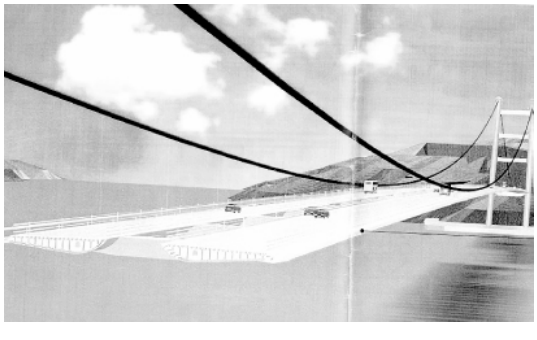


图2-1-4　香港青龙大桥效果图

图2-1-5　浙江舟山西堠门大桥预想图

第二节　悬索桥的主要结构构造

一、主　　缆

目前大跨度悬索桥的主缆每桥一般布置2根，都由高强度镀锌平行钢丝组成。一般每次把一束（PPWS法）或一根（几根）（AS法）拽拉过河架设，并在锚碇处分束锚固。除在索鞍处

外，主缆的其余部分则用紧缆机挤紧成圆形，然后隔一定距离用软质钢带临时捆扎，其次用缠丝机将软质钢丝（圆形或S形）紧密地缠绕在主缆表面，并进行外部涂装防腐。

迄今为止，只有很少的大跨度悬索桥采用4根主缆（每侧2根），并且每侧的2根主缆一般都是共用同一吊点。如图2-1-6所示。

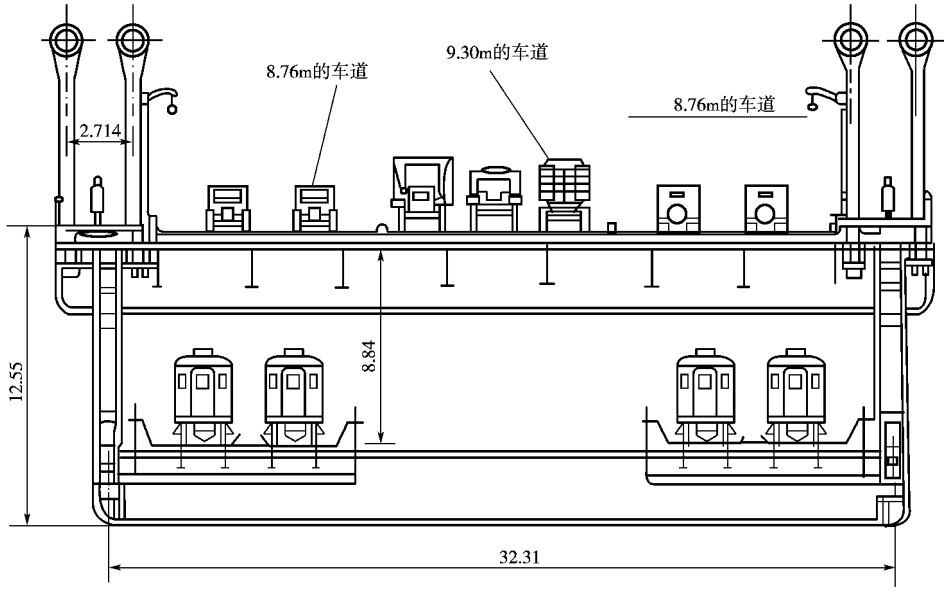


图2-1-6　美国乔治华盛顿桥横断面（尺寸单位：m）

主缆的每根镀锌钢丝的直径一般为ϕ5mm左右，根据缆索受力大小和钢丝的强度，就可以计算出需要的钢丝数量，而每束锚固钢丝的根数，则要根据主缆架设方法确定。一般采用AS法架设的束股可达300～500根钢丝，而采用PPWS法架设的束股一般根据跨度和拽拉设备能力等，每束钢丝可采用61、91、127、169等根数组成稳定的六边形（图2-1-7），并且钢丝束在工厂预制，运至桥位直接架设。

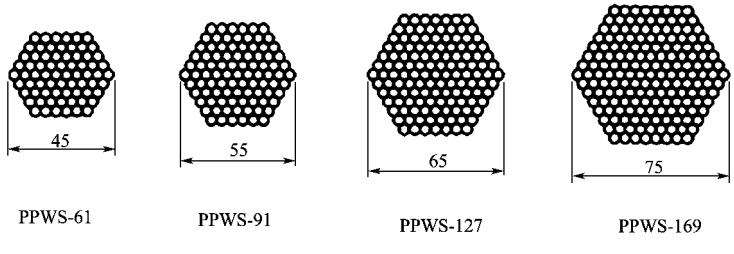


图2-1-7　主缆束股示意图

二、主　　塔

大跨度悬索桥一般采用在顺桥方向柔性的塔结构，其下端为固结的单柱式。塔的横桥向一般采用刚架式（图2-1-8 a））、桁架式（图2-1-8b））、二者的混合结构（图2-1-8 c））来联结两侧的立柱，形成横向较大刚度的结构来抵抗横桥向的风力和地震作用等。

大跨度悬索桥的桥塔材料一般有钢和混凝土，一般可根据材料和人工价格、工期以及桥址处的条件等因素综合考虑后选择使用。

三、锚　　碇

自锚式悬索桥不需要设置锚碇结构，主缆直接锚固于加劲梁上，如图 2-1-9 所示；一般悬索桥的锚碇分为重力式锚碇和隧道式锚碇，分别如图2-1-10 a)和图 2-1-10 b)所示。

1. 重力式锚碇

重力式锚碇，顾名思义，就是靠大体积的混凝土或片石混凝土所具有的巨大的重力，将主缆锚固。在锚碇中根据需要，设立若干钢结构锚固架，使锚固主缆用的钢锚杆准确架立定位，将索股拉力扩散到混凝土锚体中。而索股通过锚头与锚杆联结，如图 2-1-11 所示。图 2-1-12 为两个交叉设置的悬索桥重力式锚碇。

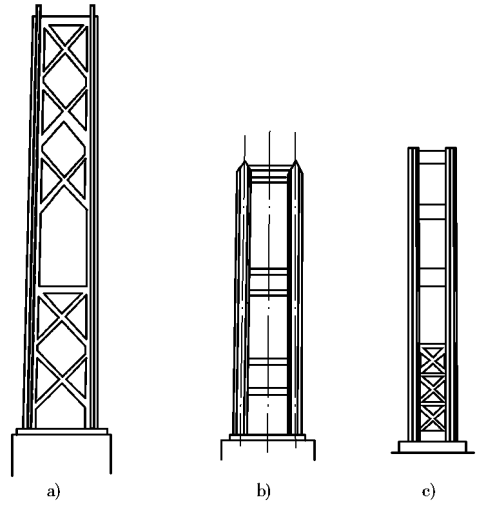


图 2-1-8　塔身横向结构布置图

a)刚架式；b)桁架式；c)刚架式和桁架式混合

2. 隧道式锚碇

当桥端具有较坚固岩体时，可查清其力学性能及岩体的整体性等情况，满足要求时可将岩体开凿成洞，再将钢结构锚固架和钢锚杆在洞中准确架立定位，然后灌注混凝土，利用岩体的嵌固作用将主缆锚固。在悬索桥锚固位置地质情况不是很好的情况下，可采用复合式锚碇系统（图 2-1-13），即在普通隧道锚的后部增加锚杆（束）系统，将缆索传来的拉力部分传给岩锚承受，以便在经济的同时保证安全。总之，采用隧道锚可大大减少锚碇的混凝土用量，节省工程费用。

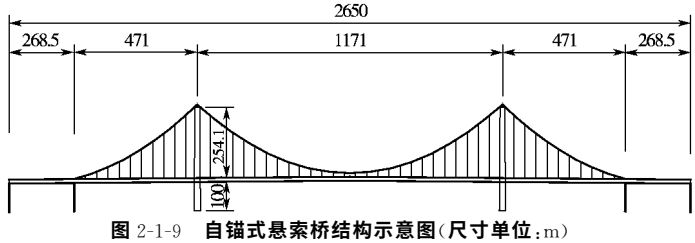


图 2-1-9　自锚式悬索桥结构示意图（尺寸单位：m）

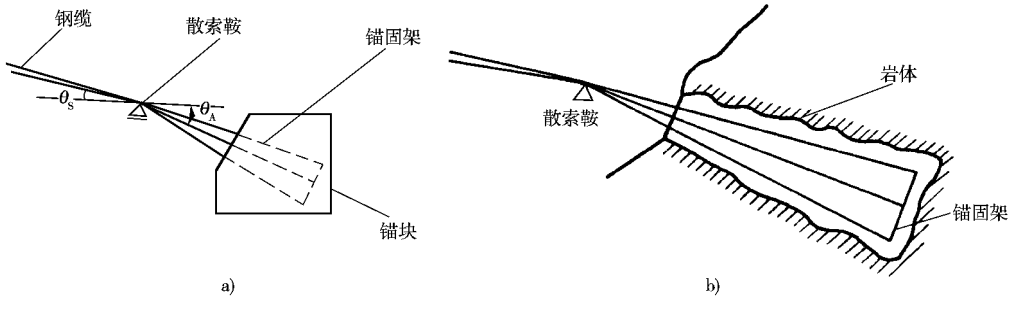


图 2-1-10　重力式锚碇和隧道式锚碇示意图

a)重力式锚碇；b)隧道式锚碇

四、加　劲　梁

加劲梁的结构主要有桁架式和扁平钢箱式，如图 2-1-14 和图 2-1-15 所示。前者由于刚性

大并方便设置双层结构，所以多见于铁路桥和公路、铁路两用桥。二者用钢量相比，钢箱梁要较小，对于纵向中空，底板呈曲线的所谓第三代钢箱梁，由于其空气动力性能更好，可大幅度减少用钢量。

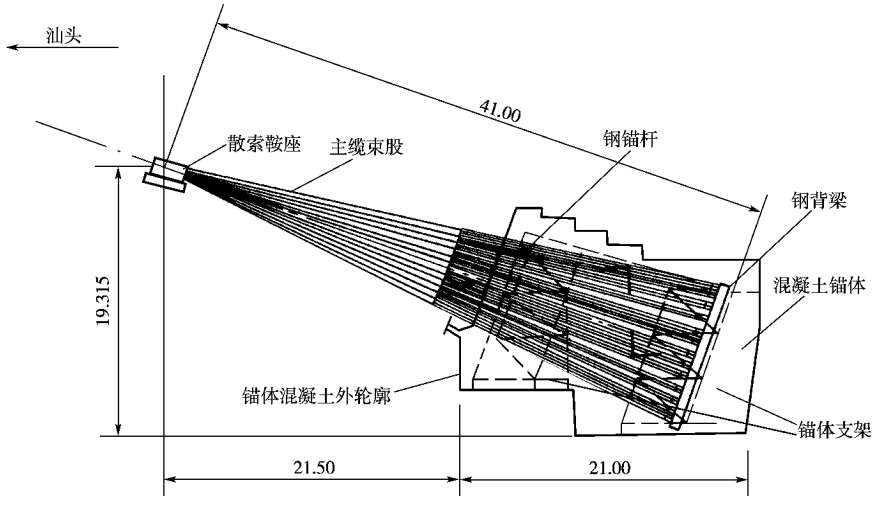


图 2-1-11　索股通过锚头与锚杆联结(汕头海湾大桥)(尺寸单位：m)

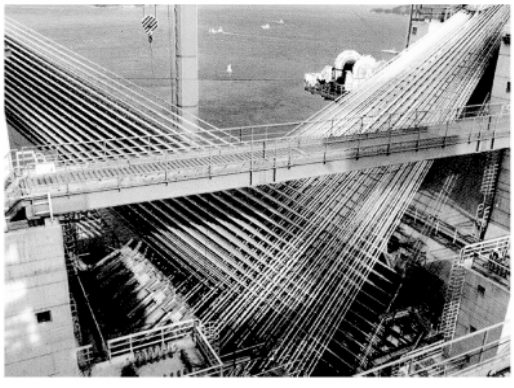


图 2-1-12　两交叉设置的悬索桥重力式锚碇

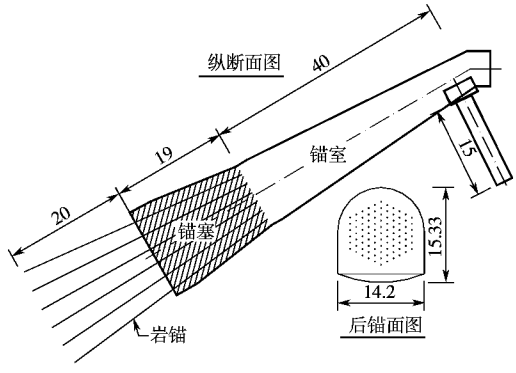


图 2-1-13　隧道式锚碇(忠县长江大桥)(尺寸单位：m)

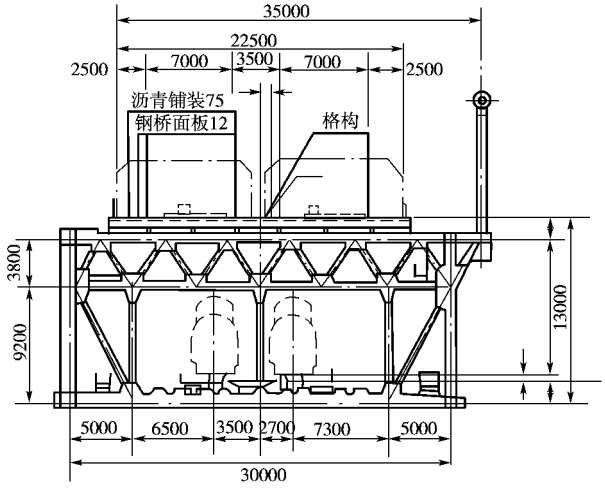


图 2-1-14　钢桁梁加劲梁(尺寸单位：mm)

五、吊　　索

吊索是将桥面承受的所有荷载传递到主缆上的构件，其上下两端分别与主缆和加劲梁相

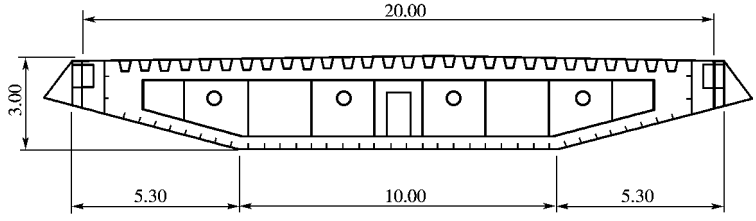


图 2-1-15　扁平钢箱梁加劲梁(尺寸单位：m)

连。目前吊索的布置一般有斜置索(图 2-1-16)和竖置索(图 2-1-17)两种。斜置索可以提高桥梁的振动阻尼，但构造比较复杂、经济上不占优势，而且疲劳问题没有完全解决，故应用较少。而竖直索被较广泛地应用在大跨悬索桥上。

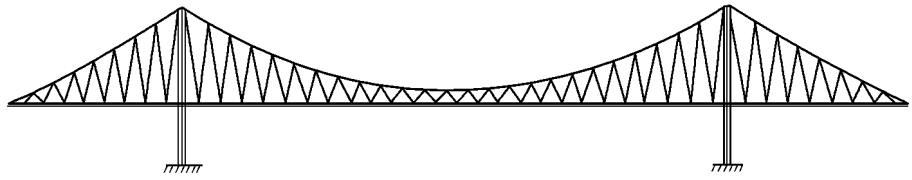


图 2-1-16　斜置吊索布置图

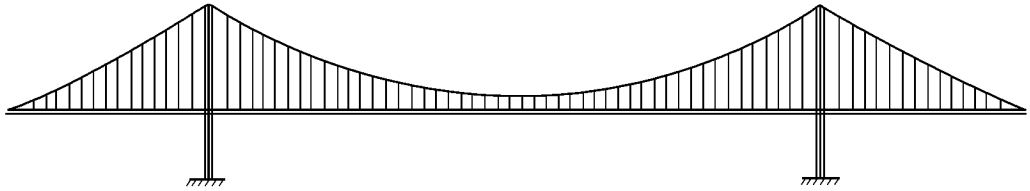


图 2-1-17　竖置吊索布置图

1. 吊索与主缆的连接

大跨度悬索桥吊索与主缆的连接主要有骑跨式(图 2-1-18)与销接式(图 2-1-19)两种。

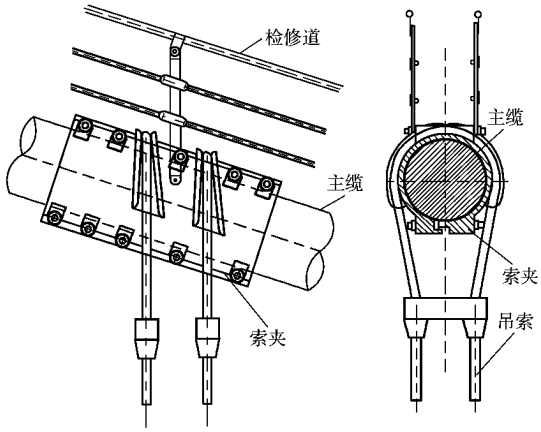


图 2-1-18　骑跨式吊索与主缆连接

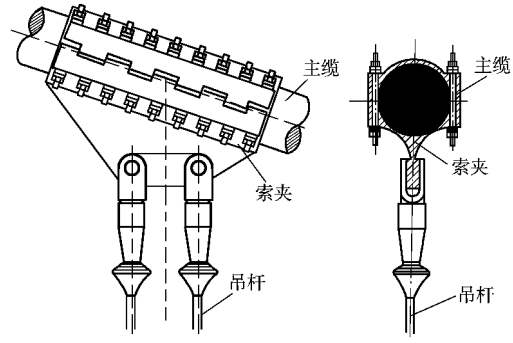


图 2-1-19　主缆与索夹的销接

骑跨式连接时钢丝绳吊索通过索夹上预留的槽口吊挂在主缆上，槽口的构造允许吊索在

顺桥向有少量的摆幅，以避免由于主梁在活载、温度、风载等作用下产生的纵向位移引起的弯折。销接式的连接既可用于钢丝绳吊索，又可用于平行钢丝束吊索。

2. 吊索与加劲梁的连接

吊索与加劲梁的连接因加劲梁的截面形式不同而各异。箱型加劲梁常见的是，通过箱梁风嘴上斜腹板处的预留护筒口，将吊索锚头穿过防护套筒锚于箱梁内，如图 2-1-20 所示。

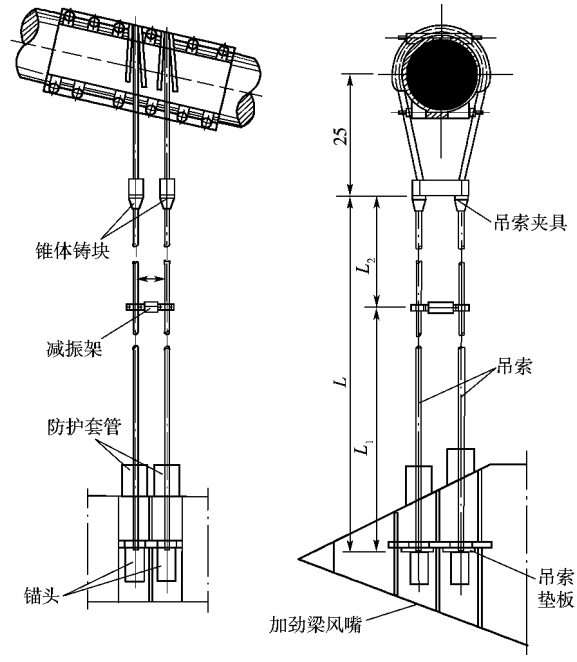


图 2-1-20　吊索与加劲梁连接（尺寸单位：mm）

第三节　大跨度悬索桥施工的主要机械设备

大跨度悬索桥与小跨度悬索桥的施工方案有显著的不同，相应地，其施工机械设备和施工工艺也就截然不同。本节主要介绍大跨度悬索桥的上部结构施工的主要机械设备，而将其大型基础的施工设备放在以后的有关章节分别予以介绍。

一、主缆架设的牵引设备

牵引系统是大跨度悬索桥主缆架设的关键设备。常用的牵引系统有循环和往复两种形式。

循环牵引系统把牵引索的两端插接起来，形成环状无极索，通过一台驱动装置和必要的支撑滚筒作循环运动。为了使此系统正常运转还要设张紧设备和调整装置。这种循环牵引系统又可分为小循环（图 2-1-21）和大循环（图 2-1-22）两种。小循环一般是分别在上、下游按竖向

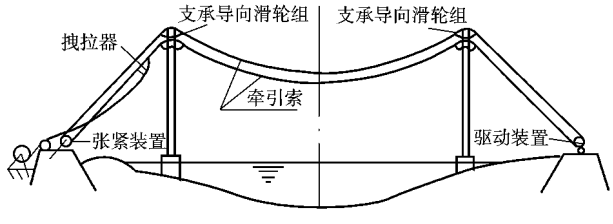


图 2-1-21　小循环牵引系统示意图

布置，大循环一般是水平设置，供上、下游索股共同使用。循环式牵引系统是靠驱动装置的滚筒以摩擦方式驱动，牵引速度连续性能好，但牵引力较小，适用于 AS 法架设和较小跨径悬索桥的 PWS 法架设。

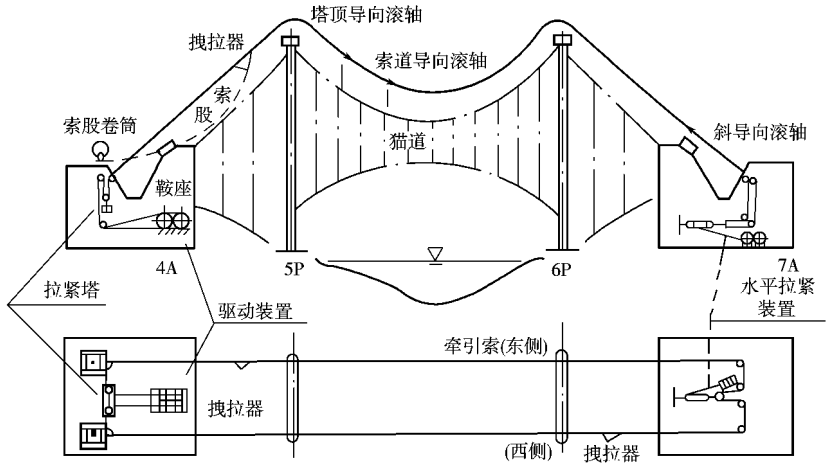


图 2-1-22　大循环牵引系统示意图

往复式牵引系统(图 2-1-23)的牵引索两端分别卷入主副卷扬机，一端用于卷绳进行牵引，一端用于放绳，两台驱动装置联动，使牵引索作往复式运动。往复式牵引系统是把钢丝绳直接卷在卷扬机上容易实现较大牵引力。大跨径的悬索桥采用 PPWS 法架设需要较大的牵引力，因而比较适宜采用此法。

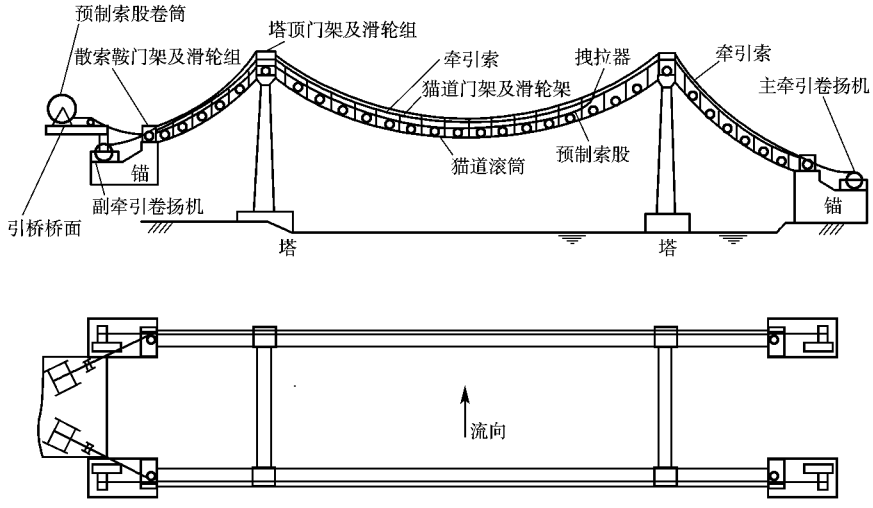


图 2-1-23　往复式牵引系统示意图

(1)大吨位智能化主牵引卷扬机。近年来，国内有关单位针对主缆施工过程中出现的扭转、松弛、鼓丝、绑扎带断裂等质量通病，对牵引系统技术方案配套机具进行优化设计和创新，实现牵引系统全过程连续牵引的智能化控制。该套牵引系统(图 2-1-24)的卷扬机为摩擦式；控制部分采用进口变频器来实现无级调速，在牵引过程中具有智能化测速、测长、测重功能，可对牵引系统的绳速、位置、张力进行全过程跟踪显示和自动控制。

这种卷扬机主要由电动机、带制动轮的联轴器、减速器、力矩电机、单轴组装、卷筒组件、底

座及变频器、传感器、PLC 控制器等电控部分组成。其主要技术参数如下：

钢丝绳额定拉力：250kN　　钢丝绳额定速度：8～25m/min

卷筒直径：600mm　　容绳宽度：1800mm

卷筒容绳量：3000m　　钢丝绳缠绕层数：17

钢丝绳型号：6X19-36-185-I(GB 1102—74)

减速器型号：JZQ1000-15.75-IV　　电动机型号：Y355L—6

电动机功率：250kW　　变频器：VS—616G5/4300

制动器：YWZ4—600/201　　整机质量：约 15000kg

外形尺寸(长×宽×高)：4400mm×3900mm×2260mm

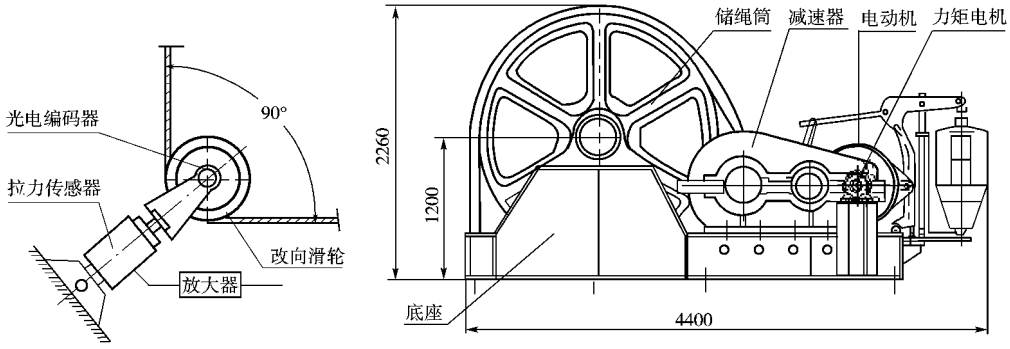


图 2-1-24　大吨位主牵引卷扬机(尺寸单位：mm)

(2)被动放索机构(相当于副卷扬机)。一岸放置牵引卷扬机，另一岸放置主缆索盘，如图 2-1-25 所示。牵引系统主牵引方向索股被牵引方向一致，另一侧跟随放索，由该侧导轮组产生的摩阻力反而会对牵引系统产生一个反拉力，使牵引索始终保持张紧状态，有利于拽拉器顺利通过导轮组，提高了牵引速度。由于牵引索张力相对减少，卷扬机吨位相对较小，南岸转向轮不需设置驱动装置。

图 2-1-25　被动放索机构

(3)该套牵引系统的牵引卷扬机为摩擦式，控制部分采用进口变频器来实现无级调速，在牵引过程中具有智能化测速、测长、侧重功能，可对牵引系统的绳速、位置、张力进行全程跟踪显示和自动控制。

(4)该套牵引系统与放索系统匹配完善。被动放索盘架的力矩电机给索盘提供反力矩，保证索股出索速度与牵引速度一致，索股不会产生散索及呼啦圈现象。牵引系统与被动放索机构配合，能够满足 20～25m/min 的全程牵引。

(5)双向牵引系统相对于单线牵引系统，减少了一个空行程，提高了架索效率。

一套牵引系统牵拉一根索完成时间构成：吊放索盘至放索架 20 min，后锚辅助牵引 15 min(平均为 5m/min)，主牵引 120 min(平均为 16～24m/min)，横移 30 min，整形入鞍入锚 60 min，完成一个牵引架设循环需 4h 5 min。

门架式拽拉器牵引方式，如图 2-1-26 所示。

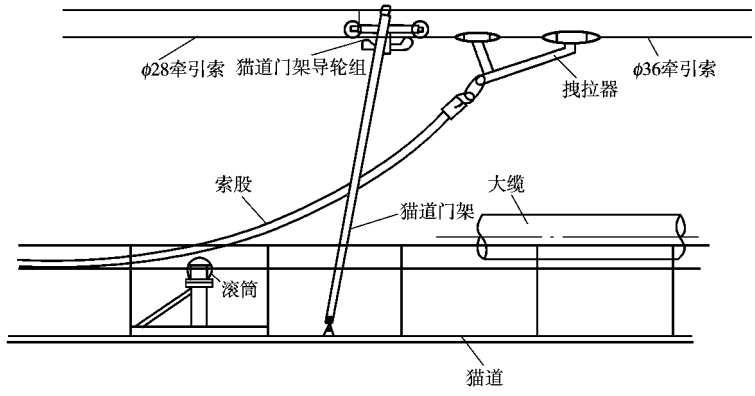


图 2-1-26　门架拽拉器牵引方式示意图

门架式拽拉器牵引方式是在猫道上设置若干猫道门架，并在其上安装导轮组。在锚碇和塔顶转向处安装特制的导向滑轮组，分别如图 2-1-27 和图 2-1-28 所示。主（副）卷扬机的收（放）绳或放（收）绳，使牵引索带动拽拉器穿过导轮组作往复运动，把主缆索股牵引过河。这种方法可以用于 PPWS 法，也可以用于 AS 法。

图 2-1-27　锚碇门架滑轮组

图 2-1-28　塔顶门架滑轮组

轨道式小车牵引方式如图 2-1-29 所示，轨道式小车牵引方式的牵引索运行于索股滚筒上，小车运行于滚筒两侧的轨道上，与牵引索固结。主（副）牵引卷扬机的收（放）绳或放（收）绳，使牵引索带着小车在轨道上作往复运动，索股前端锚头置于小车上，后部索股在索股滚筒上运行。这种方法只能用于 AS 法，而不能用于 PPWS 法。

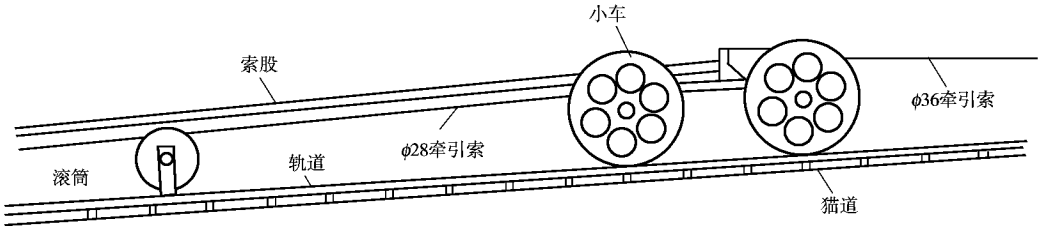


图 2-1-29　轨道式小车牵引方式示意图

二、主缆紧缆机

主缆紧缆机的总体结构，如图 2-1-30 所示，主缆紧缆机主要由紧固装置、走行装置、液压系统等部分组成。

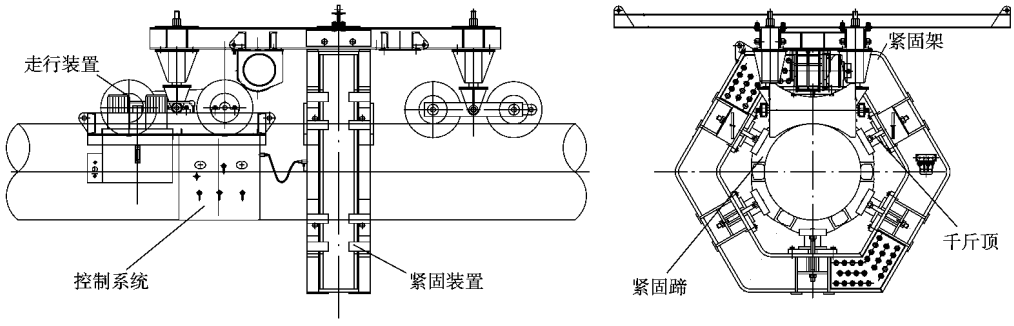


图 2-1-30　主缆紧缆机

(1)紧固装置。紧固装置是紧缆机的工作部分，主要由紧固蹄、液压千斤顶及其安全座等组成。

(2)走行装置。走行装置是紧缆机的行走部分，主要由台车、台车架等组成。其行走采用塔顶卷扬机牵引或本机自带卷扬机牵引运行，为增加运行的稳定性，通过简易缆索天车的手动葫芦，调整紧缆机的两侧高度，保证左右平衡。

(3)液压系统。其由超高压泵站、高压软管、快换接头、控制阀等组成，为紧固装置提供动力。

三、主缆缠丝机

主缆缠丝机，如图 2-1-31 所示。

主缆缠丝分为圆形钢丝和 S 形钢丝。表 2-1-3 为润扬长江大桥 S 形钢丝缠丝机的技术参数。

圆形钢丝缠丝机结构构造相对较简单，国内正在研制两种钢丝兼容作业的缠丝机。

图 2-1-31　缠丝机在作业

四、跨缆吊机

跨缆吊机是垂直提升吊装悬索桥加劲梁的专用设备，其支承并行走在悬索桥主缆上，并具有跨越索夹的功能。其主要由液压起吊提升系统、缆上支撑及行走系统、钢结构桁架梁、中央控制系统、液压动力系统、扁担梁、辅助系统、临时安装托架以及安全防护系统组成，如图 2-1-32 所示。

润扬长江大桥 S 形缠丝机的技术参数　　表 2-1-3

项　目	技术参数	项　目	技术参数
缠丝方法	连续缠丝	缠丝张力(kg)	最大 300
缠丝方向	上坡和下坡	钢丝数量(线)	2
适用钢丝	S 形钢丝	绕线筒能力	300kg×2 个绕线筒

续上表

项　目	技术参数	项　目	技术参数
主缆直径(mm)	906	行走速度	1.3/1.6m/min 50/60Hz
主缆索夹长度(mm)	最大 1700	倾角(°)	30
缠丝转速	1.5～30rad/min	电压	AC220,380,480V 50/60Hz
缠丝速度	11.25～225.6mm/min	重力(kN)	75
移动方法	齿条式	控制和监控	缠丝/移动分离,张力速度同步
行走方法	2 卷扬机		

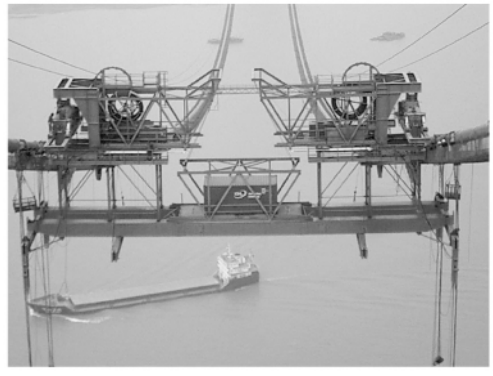


图 2-1-32　跨缆吊机

大跨度悬索桥施工的内容主要有主塔、主缆、加劲梁等,以下二、三、四章将分别作出介绍。

第二章 悬索桥主塔和索鞍施工

DIERZHANG

根据桥塔的规模、结构形式、架桥地点的各种条件以及经济性，可采用浮吊法、塔吊法、爬升式起重机法和滑模法、翻模法及爬模法等施工方法。

第一节　钢桥塔和混凝土桥塔的安装

一、钢桥塔的安装

钢桥塔的施工，一般采用浮吊法、塔吊法和爬升式起重机法。

1. 浮吊法

浮吊法是将桥塔整体一次或分次安装的方法，日本目前最大的浮吊可起重 3500t，起吊高度为 90m，一般用于塔高 80m 以下，跨度为 500m 左右的悬索桥塔施工。

2. 塔吊法

安装钢桥塔采用完全独立的塔吊进行桥塔架设，由于桥塔上不安装施工机械，因而施工方便，精度易得到保证，但设备费用较高，详见“第一篇　大跨度斜拉桥施工　第二章　第三节”的内容。

3. 爬升式起重机法

首先在塔柱侧面安装护轨，安装可沿其爬升的起重机逐段起吊安装塔身。这种方法要求严格控制桥塔的铅垂度。

二、混凝土桥塔的安装

混凝土桥塔的施工，一般采用滑模法、翻模法或爬模法。

1. 滑模法

此法对高桥墩和桥塔都曾广泛使用，而且能够施工变截面结构，其特点是：连续作业，表面光滑，安全可靠，能实现液压自控升降，但一般成本较高，作业控制要求严。

2. 劲性骨架挂模滑升法

此法是在滑模法的基础上，利用在塔内预埋劲性骨架作为模板的支撑依托，从而使作业平台与模板互不影响，同时由于模板固定在劲性骨架上，调整比较方便。此法模板依靠工作平台

上部的桅杆吊提升。如图 2-2-1 所示。

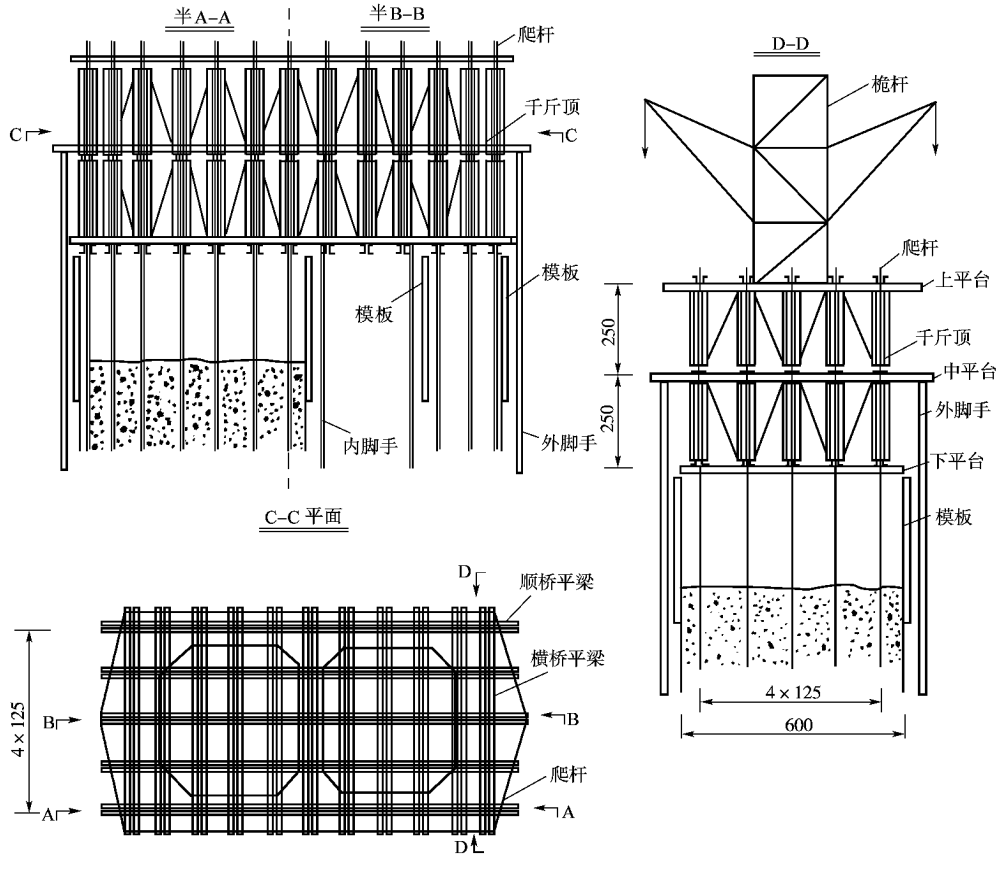


图 2-2-1　滑升平台布置图(尺寸单位:cm)

劲性骨架在悬索桥桥塔、斜拉桥桥塔、拱桥拱圈、V 形桥墩等结构中都有使用。劲性骨架一般用型钢或钢管制作而成，其既可作为模板的支持撑结构，又可作为纠偏施力的依托。劲性骨架一般作为部分钢筋在设计计算中予以考虑。图 2-2-2 是某桥塔身劲性骨架的布置示意图。

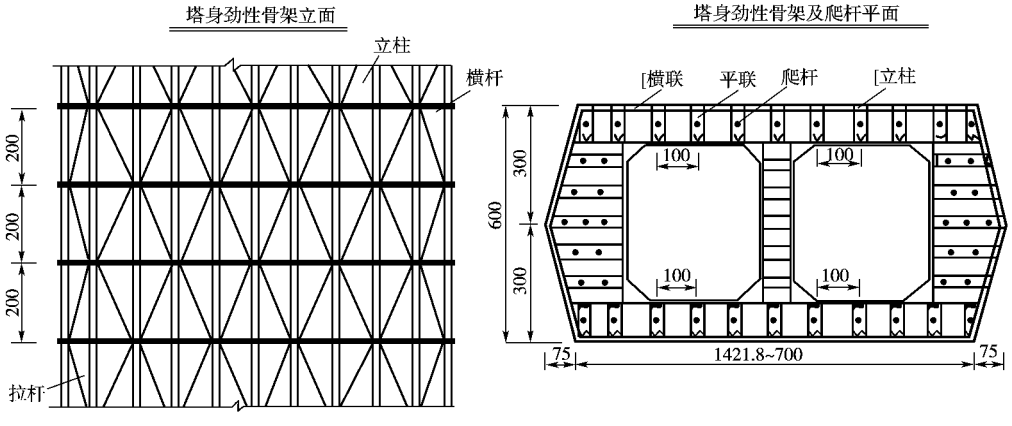


图 2-2-2　桥塔内劲性骨架构造图(尺寸单位:cm)

模板系统由型钢架与喷塑钢板构成，模板块件之间用扣件联结，并以内埋式螺栓与塔身劲性骨架焊接。模板一般为两层，每层高约 2m。由于模板用埋头螺栓挂在劲性骨架上，模板结构比较简单，拆模也不必等到混凝土到达一定强度。如图 2-2-3 所示。

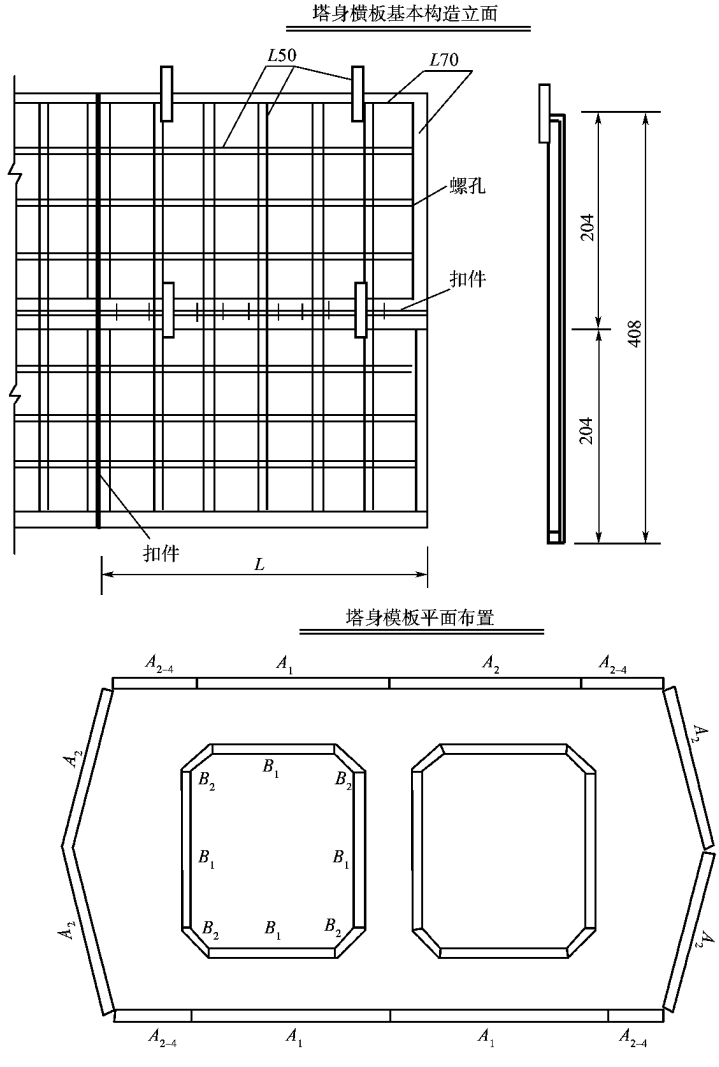


图 2-2-3　塔身模板布置图(尺寸单位：cm)

为了提升运输材料方便，在每侧塔柱的外侧设置一台塔吊，并设电梯供作业人员上下之用。

施工程序：

(1)施工准备。塔基完成后，在其顶面精确放出塔身平面位置，塔基以上一定高度内埋入劲性骨架、滑升平台爬杆和塔身钢筋，采用立模现浇混凝土，目的是为滑架等施工设施留下足够的安装高度。之后安装塔吊、滑升平台、挂模等，开始滑升浇筑塔身混凝土。

(2)塔身测量控制。在塔身 x、y 轴线上设全站仪，在塔身轴线上设观测标志，塔身上升过程中随时检查校正塔身坐标位置。

在横桥向及纵桥向两侧按一定的高度分别安装测温元件，随时控制温度引起的桥塔变形值，计入塔身变形校正。

(3)塔身混凝土宜采用泵送。拆模后人工清水处理表面,喷洒养生剂养生。

(4)滑升速度与滑升机构设置有关,一般每日 1～2m。

3. 翻模法

如图 2-2-4 所示,每个塔柱一套模板,模板用 $\delta=6\sim8$mm 的钢板和加劲肋组成,外模一般

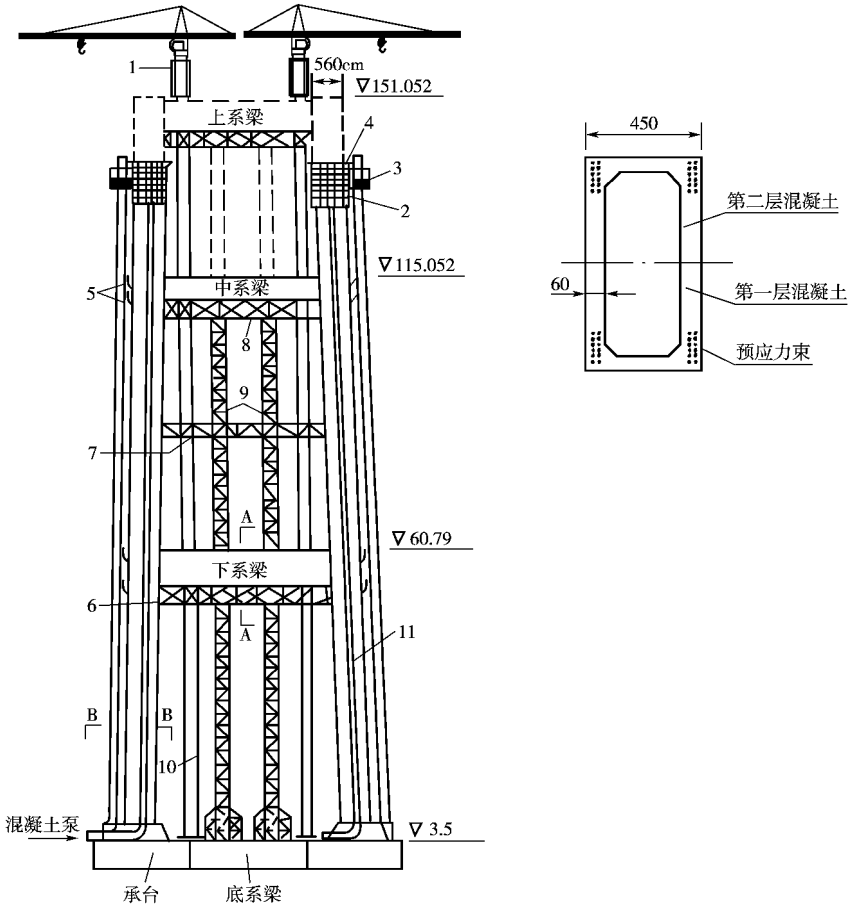


图 2-2-4 翻模施工布置(尺寸单位:cm;高程单位:m)

1-塔吊;2-钢翻模;3-电梯;4-工作平台;5-张拉工作平台;6-牛腿;7-抗风横撑;8-"六四"军用梁;9-万能杆件支架;10-塔吊柱;11-混凝土输送泵管

分上、下两节,每节由多块模板栓接而成。每塔配自升式塔吊 2 台,承担钢筋及设备运输,并配合提升模板、混凝土泵送。配升降机 2 台载运施工人员上下。

施工过程中,两节模板交替轮番向上提升安装,每节都立在已浇好混凝土的模板顶,在收坡方向模板每次向内收一个螺孔位,如图 2-2-5 所示。

翻模的施工速度一般为 1～2m/d。

塔柱下系梁采用在承台上搭设支架的方法灌注,中、上系梁均采用在下一系梁搭设支架和在塔柱侧面预埋牛腿共同支承的方法灌注。为了节省工、料,系

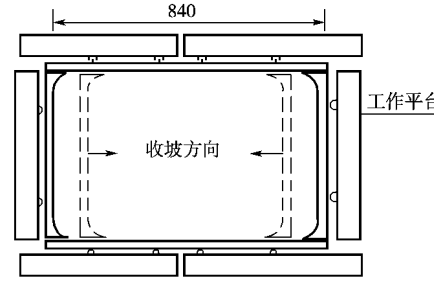


图 2-2-5 外模收坡示意图(尺寸单位:cm)

梁可根据情况分两层灌注，设置预应力时，预应力钢筋也要分批张拉。

4. 爬模法

爬模法施工见“第一篇　大跨度斜拉桥施工　第二章　索塔施工　第二节　混凝土索塔的施工”。

第二节　悬索桥索鞍吊装施工

一、索鞍的基本构造

1. 主索鞍

主索鞍由鞍头、鞍座和底座等组成，一般为铸焊混合结构，鞍头用铸钢铸成，鞍座用钢板焊接，鞍座与鞍槽焊接成鞍体，底座是鞍体在塔顶能相对滑移的平台，在鞍体与底座之间设不锈钢板——聚四氟乙烯滑动副，以适应施工中的相对移动。底座安装于设在塔顶的格栅上，如图2-2-6a)所示。

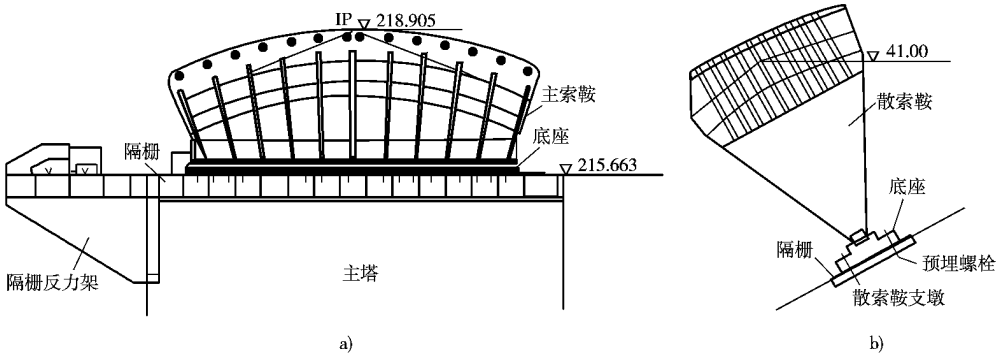


图 2-2-6　主、散索鞍结构(高程单位：m)

a)主索鞍；b)散索鞍

为减轻主索鞍的吊装和运输质量，一般将主索鞍顺桥向分成两半，待吊至塔顶后用高强螺栓拼接。为克服施工中主跨和边跨的不平衡力，减小由不平衡力产生的主塔偏移，主索鞍在安装时向边跨侧设一定量的预偏值，在施工过程中逐渐顶推至设计位置。鞍槽内设置竖向隔板，以方便索股安装定位并增加鞍与主缆之间的摩擦力，在索股全部架设完成后，用锌块将鞍槽填平。

在塔顶主索鞍处混凝土浇筑时，应准确安装格栅，以及塔顶门架等预埋件。

2. 散索鞍

散索鞍安装在锚碇散索鞍支墩顶部，其主要作用是将主缆经散索鞍后在水平、竖向两个方向转向分散并与锚固系统相连。一般悬索桥每端设2个散索鞍。

散索鞍由鞍头、鞍座和底座等组成，如图2-2-6b)所示。一般也为铸焊混合结构，鞍头用铸钢铸成，鞍座采用钢板，鞍体铰接于底座之上，与主索鞍类似，散索鞍在安装时向锚后方向设一定量的预偏角度，随着钢箱梁的吊装和桥面铺装的完成，鞍体逐渐转动至成桥设计位置。索股架设完成后，用锌块填平鞍槽。

在锚碇散索鞍支墩散索鞍位置处混凝土浇筑时，应准确埋设散索鞍预埋件，预留格栅安装混凝土槽口，并在混凝土表面设置纵、横向中心标志。

二、索鞍吊装施工

1. 主索鞍

如图 2-2-7 所示，格栅、底座和主索鞍等构件准备就位后，先吊装格栅。当起吊到适当高度后，移动门架顶部平车，将格栅移至设计位置时，缓缓放下落到塔顶。

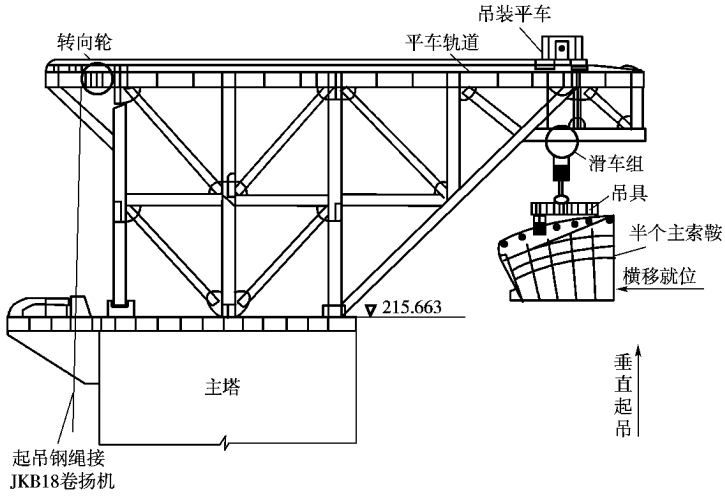


图 2-2-7　主索鞍吊装图(高程单位：m)

利用精密水准仪及经纬仪等测量仪器，通过格栅调整框架和设在格栅底部的楔形钢垫块，调整格栅的高程及平面位置，使格栅定位误差在设计允许范围内，经检查无误后浇筑格栅混凝土并保证其在施工过程中不变位。

格栅吊装完成后，吊装底座和主索鞍鞍体。具体为：先吊装边跨侧半个主索鞍，再吊装中跨侧半个主索鞍，最后将两个半索鞍用高强螺栓连接。在主桥上部结构安装过程中，随着钢箱梁和桥面铺装的完成，索鞍逐步顶推到位，最后割除格栅千斤顶反力架，并补浇塔顶缺口处混凝土。

2. 锚碇散索鞍

如图 2-2-8 所示。散索鞍一般相对较轻，可用塔吊直接吊装。先将格栅吊至散索鞍支墩顶部的混凝土预留槽口内，再通过手拉葫芦配合，缓缓将预埋螺栓穿入格栅上的螺栓孔内，精确调整格栅位置使其与混凝土表面标志对齐，检查高程准确无误后，浇筑格栅混凝土。待混凝土强度达到设计要求的强度(一般为 85%)后，再利用锚碇门架将底座吊至格栅上的设计位置安装。混凝土强度达到设计要求强度后，利用锚碇门架吊装散索鞍。

为确保散索鞍的安装质量，可利用专门的散索鞍定位调整框架，散索鞍在锚碇门架和起吊系统与调整框架的共同作用下，缓缓下放至设计位置。安装就位后，在散索鞍后部设置一高强度拉杆将索鞍固定，如图 2-2-9 所示，以保证散索鞍在主缆索股架设到一定数量之前保持稳定。

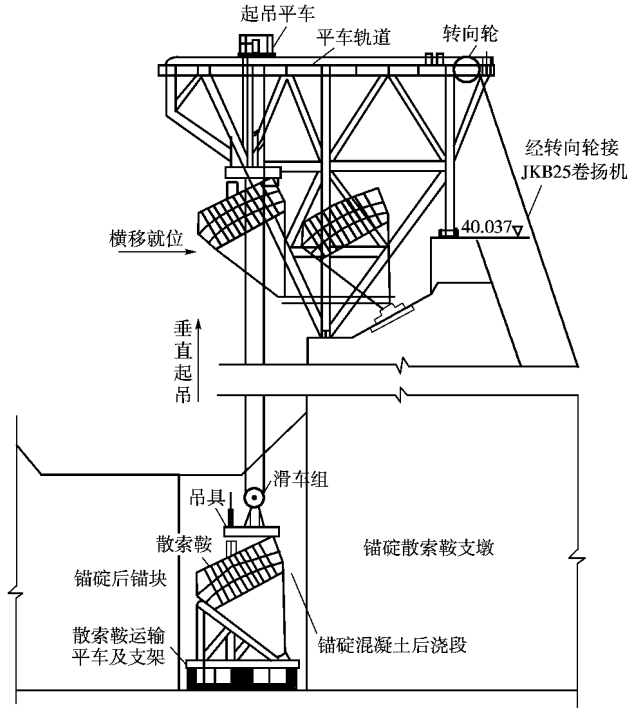


图 2-2-8　**散索鞍吊装图(高程单位**:m)

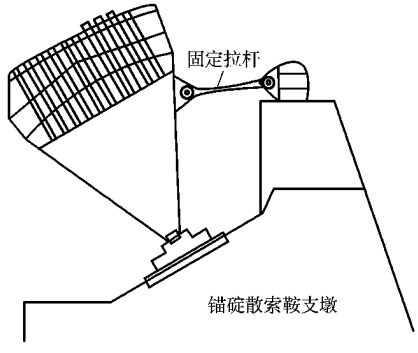


图 2-2-9　**散索鞍固定**

第三章 猫道和主缆架设施工

DISANZHANG

第一节　主缆架设的准备工作

一、引导索的架设

1. 水中渡海法

水中渡海法，如图 2-3-1 所示，它是将引导索慢慢放入水中，同时用牵引船引向对岸的方法。这种方法限制航行，水下地形复杂或水流速度高时不安全，但节省设备，缩短工期。

2. 浮子法

浮子法，它是将引导索间隔一定距离安上浮子，以避免导索沉到水底而出现不安全的情况，并用牵引船引向对岸的方法。

3. 空中渡海法

空中渡海法，它是为了不让引导索接触水面，用浮吊牵引导索过海的方法。引导索架设，如图 2-3-2a)所示。

图 2-3-1　水中渡海法架设引导索

4. 火箭抛绳法

利用发射火箭的方法使引导索越过深沟峡谷到沟谷对面，如图 2-3-2b)所示。沪蓉西高速公路四渡河特大桥是用此种方法施工。

5. 直升飞机索引法

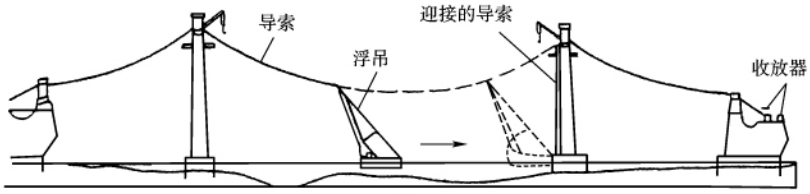
在地形比较平坦的桥位，利用直升飞机牵拉先导索过海的方法。

在河底平坦无障碍的情况下，为了减少封航次数、缩短施工工期，也可取消引导索，直接将牵引索牵引过江，如图 2-3-3 所示。润扬长江大桥南汊悬索桥就是采用这种方法施工的。

二、牵引索的安装

牵引索用引导索牵引、安装，也可直接牵引过江。国内几座大跨度悬索桥的引导索过江情

况，如表 2-3-1 所示。



a)

b)

图 2-3-2　空中渡海法及火箭抛绳法引导索过江

a)空中渡海法引导索过江；b)火箭抛绳法引导索过江

图 2-3-3　润扬长江大桥南汊悬索桥牵引索过江

国内几座大跨度悬索桥的引导索过江　表 2-3-1

桥　名	主缆架设方法	先导索过江	备　注
广东虎门大桥	PPWS	水中渡海法	
厦门海沧大桥	PPWS	水中渡海法	
江阴长江大桥	PPWS	水中渡海法	
汕头海湾大桥	PPWS	水中渡海法	
润扬长江大桥	PPWS	无	牵引索直接过江
四渡河大桥	PPWS	火箭抛绳法	

三、猫道的架设

架设猫道相当于在主缆下形成一个临时的简易缆索桥，其作用是供主缆索股牵引和工作人员通行用。欧美、日本及中国有代表性的悬索桥的施工猫道参数，分别如表 2-3-2、表 2-3-3 和表 2-3-4 所示。

欧美悬索桥施工猫道参数　表 2-3-2

桥名 / 项目	乔治华盛顿桥	奥克兰海湾大桥	金门大桥	麦金奈克桥	维拉扎诺桥	4 月 25 日桥	塞文桥	恒伯尔桥	博斯普鲁斯二桥	大海带桥
完成时间(年)	1931	1936	1937	1957	1964	1966	1966	1981	1988	1996
总体布置形式		连续式							连续式	
跨径(m)	1067	704	1280	1158	1298	1013	987	1410	1090	1624
猫道面宽度(m)		3							3	
猫道面距主缆中心距离(m)		1.5							1.3	

续上表

项目 \ 桥名	乔治华盛顿桥	奥克兰海湾大桥	金门大桥	麦金奈克桥	维拉扎诺桥	4月25日桥	塞文桥	恒伯尔桥	博斯普鲁斯二桥	大海带桥
猫道承重绳		4φ57.2								
扶手绳		2φ12.7								
横向天桥(道)		3								
抗风缆		2φ25.4								
抗风吊杆										
其他减振措施										

日本悬索桥施工猫道参数　　表 2-3-3

项目 \ 桥名	关门大桥	大鸣门桥	南备赞濑户大桥	北备赞濑户大桥	下津井濑户大桥	大岛大桥	明石海峡大桥	白鸟大桥	来岛一桥	来岛三桥	来岛二桥
完成时间(年)	1973	1985	1988	1988	1988	1988	1998	1998		1999	1999
总体布置形式	分离式	分离式		分离式	连续式	分离式	分离式	分离式		连续式	分离式
跨径(m)	712	876	1100	990	940	560	1991	720	600	1030	1020
猫道面宽度(m)	4	4	4.5	4.5	4.5	3.5	5.5		4	4	4.5
猫道面距主缆中心距离(m)	1.5	1.5		1.7			1.7				
猫道承重绳	8φ40	6φ66	10φ56	10φ58	10φ62	6φ45	6φ64+6φ52		8φ30	8φ46	8φ46
扶手绳	2φ28	2φ28					2φ28				
横向天桥(道)	3	5					11		4		
抗风缆	2φ32	4φ66					无		无	无	
抗风吊杆	斜吊杆 φ18	竖直吊杆 φ18					无		无	无	
其他减振措施							水平制振索、抗风门架和斜索阻尼器		外索、斜拉索、联结绳		

中国悬索桥施工猫道参数　　表 2-3-4

项目 \ 桥名	汕头海湾大桥	虎门大桥	青马大桥	丰都长江大桥	江阴长江大桥	海沧大桥	忠县长江大桥	宜昌长江大桥	万州二桥	润扬长江大桥
完成时间(年)	1994	1997	1997	1997	1999	2000	2001	2001	2004	2004
总体布置形式	分离式	分离式	分离式	分离式	连续式	分离式	分离式	分离式	分离式	连续式
跨径(m)	452	888	1377	450	1385	648	560	960	580	1490
猫道面宽度(m)	4	4	3.6	3	3.8	3.6	3.6	3.8	3.1	4
猫道面距主缆中心距离(m)	1.5	1.5	1.4	1.5	1.1	1.5	1.5	1.4	1.5	1.5
猫道承重绳	6φ45	8φ48	6φ36	6φ34	6φ38	6φ48	6φ49	8φ48	6φ48	10φ54
扶手绳	2φ15	2φ26	2φ32	2φ16	2φ32	2φ26	2φ26	2φ24	2φ26	2φ20
横向天桥(道)	3	3	5	3	7	3	3	6	3	9
桥向天桥间距(m)	113	222	230	112.5	173	162	140	137	145	149
抗风缆	2φ25	2φ40	2φ32	无	2φ34	2φ40	无	无	无	无
抗风吊杆	斜吊杆	竖直吊杆 φ16	竖直吊杆 φ16	无	竖直吊杆 φ16	竖直吊杆 φ16	无	无	无	无
其他减振措施	无	无	无	无	无	无	无	无	无	水平制振索、抗风门架和斜索

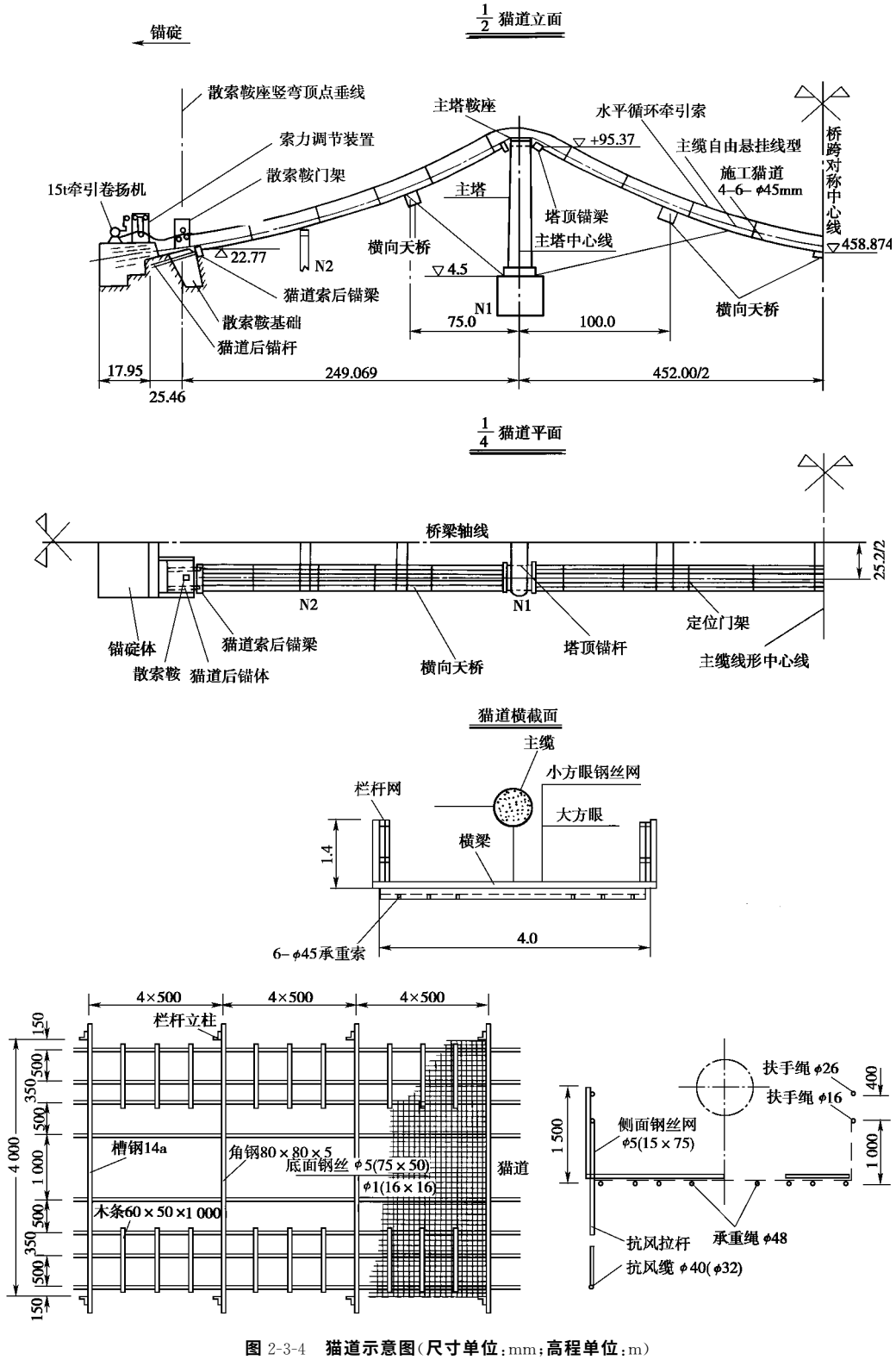


图 2-3-4　猫道示意图(尺寸单位:mm;高程单位:m)

猫道由承重索、扶手索、面层、横向通道及抗风索(或制振装置)、锚固体系等组成,如图2-3-4所示。

猫道横桥向与主缆轴线一般呈对称布置，在上下游对应于主缆中心线下方各设 1 幅猫道，猫道面板距中心线铅垂方向 1～1.8m，宽度一般为 3～5m。按猫道承重索在塔顶的跨越形式，通常有分离式和连续式两种构造布置形式。在日本，对应于 PPWS 法施工，一般采用分离式较多，而欧洲国家所采用的 AS 法施工一般惯于采用连续式。不管采用哪种形式，都需根据施工情况进行长度调节，分离式需在承重索索端设置长度调节装置，连续式还需在塔顶设转索鞍等装置。

1. 分离式猫道

(1)分离式猫道的设计

猫道以桥塔为界分为两边跨和中跨。根据施工要求和国外的设计施工经验，一般按猫道成型后承重索的中心线低于主缆架设中心线 1.5m 左右设置。该距离的选用，除应充分考虑主缆架设时施工人员操作方便外，更重要的是必须考虑索股的牵引、主缆的箍紧及涂装时使用特殊机械(如紧缆机、缠丝机)的操作空间要求。承重索两端分别锚固于锚碇前墙与塔顶的预埋件上，并于锚固构造外设置长度调节装置，如图 2-3-5 所示；亦可锚固于塔顶或散索鞍前的可调节长度的锚箱内。承重索钢丝绳两端配以热铸合金锚头。如虎门悬索桥每侧猫道共设 8 根 Φ48 的钢芯钢丝绳作为承重索，承重索的锚头同吊索锚头相同，相应的加工制作要求及灌锚要求与吊索锚头的要求相同(图 2-3-6)。调节拉杆及连接销采用强度高韧性好的 40CrNiMoA，质量符合 GB 3077—88。汕头海湾大桥每侧猫道共设 6 根 Φ45 的钢芯钢丝绳作为承重索。

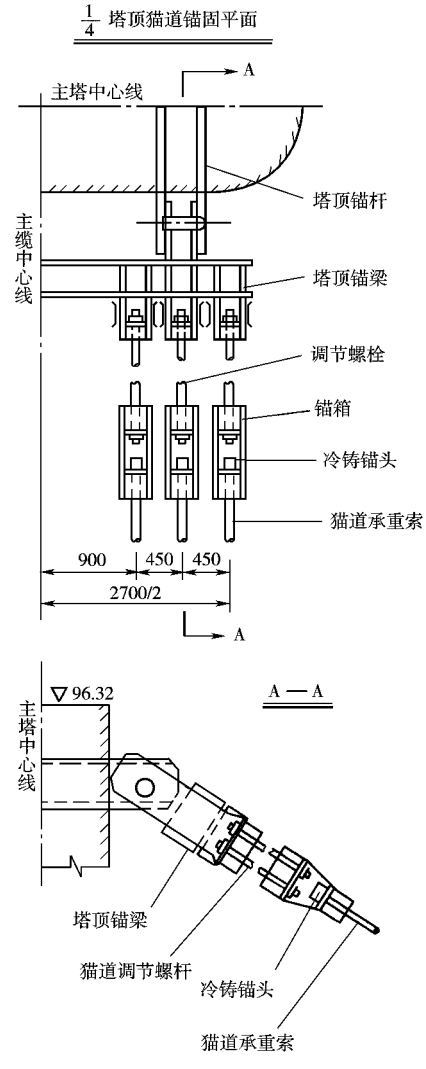


图 2-3-5 汕头海湾大桥猫道塔顶锚固示意图
(尺寸单位：mm；高程单位：m)

承重索用材及制作要求猫道作为柔性结构的临时性施工设施，所采用大部分材料为钢丝绳、钢丝网，这样不仅能满足线形、强度和刚度的要求，钢丝网又能减少挡风面积。钢丝绳要按规格选用。猫道承重索用钢丝绳需选择强度高、耐腐蚀性和耐疲劳性好、柔软性能优越、徐变小的材料。猫道系统为临时施工结构，因此在选用承重索、扶手绳、抗风缆及抗风拉杆的钢丝绳材料时，除满足强度要求外，还应考虑其经济性及重复利用的可能。

(2)分离式猫道的架设

以汕头海湾大桥为例。导索渡海架空后，沿导索再架 1 根 33mm 临时支承索，该支承索系利用南主塔顶往返式导索于空中拽拉过海到北主塔顶，其两端分别锚固于南北两锚碇上。

中跨猫道承重索的架设方向：自南塔 S1→北塔 N1。其架设方法为：将 Φ45 的猫道承重索卷盘吊到南塔顶支架上，承重索用相隔约为 30m 的滑钩组吊挂于 Φ33 的临时支承索上，后方溜放索盘，前方锚头由导索于空中拽拉过海；到位之前，承重索后方打梢于塔顶，前方以大吨位

牵引器将前锚头拉入塔顶锚箱内；返回导索，收回滑钩；再将后方的锚头拉入锚箱内。架完猫道承重索后，测量其空载垂度，调整其线形，最后将两端的锚头锁定。

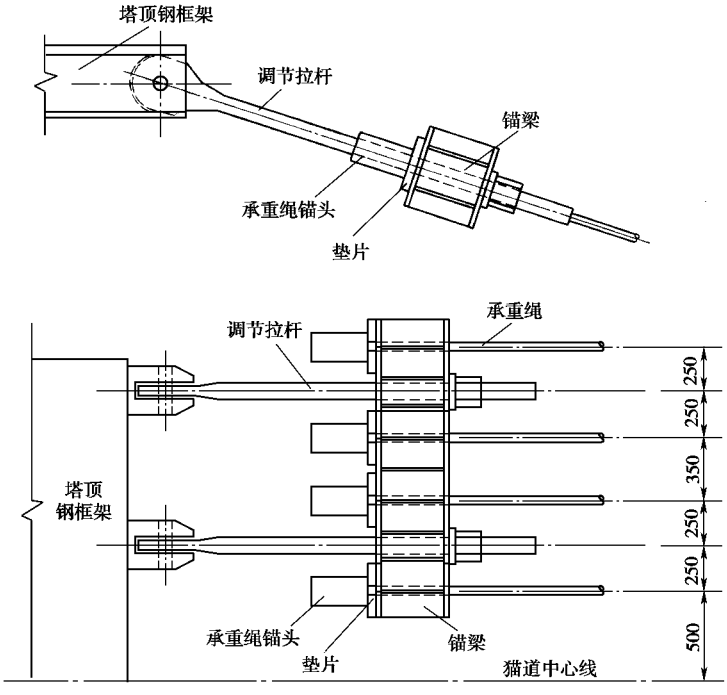


图 2-3-6　虎门悬索桥塔顶部位承重索调节装置(尺寸单位：mm)

猫道面的大、小方眼钢丝网在地面上预制成 30m 长的猫道面层节段，卷盘后吊运到塔顶的放盘支架上；在塔顶平台的上方，将猫道面层铺放于承重索上，带上猫道面层同承重索的连接螺栓；由导索拽拉猫道面层的前端横梁，猫道面层沿承重索下滑；逐段拽拉下滑，逐段安装，直至跨中合龙。横向天桥在塔顶安装，并随同猫道面层被拽拉下滑到位，尔后安装扶手索和栏杆网。

2. 连续式猫道

(1)连续式猫道设计

以润扬长江大桥南汊悬索桥为例。

润扬长江大桥南汊悬索桥猫道主要技术参数：

①每侧猫道设 10 根 ϕ54 镀锌承重索，安全系数大于 3，采用三跨连续的布置形式，当三段承重索在分别架设完成后在索塔靠近中跨一侧连成一根并在塔顶设置支撑鞍，并通过在塔顶附近设置变位刚架及下压装置，使猫道与主缆线形保持一致。

②每侧猫道各设 3 根扶手索(ϕ20＋2×ϕ16)。

③猫道面层由一层粗面网和一层细面网构成，其上每隔 0.5m 绑扎一根防滑木条。在猫道面层网上每隔 6m 设一道 50×50×2.5 方钢管，每隔 6m 设一道 80×80×4 方钢管，交替设置，另外每隔 50m 设置一道 H175×175 型钢门架，其由 2ϕ54mm 门架承重索固定，并与猫道共同形成空间结构。

④为了人员通行和增加猫道结构的整体稳定性，猫道中跨设置 9 道横向通道，边跨各设置 2 道横向通道。

⑤为了改善猫道抗振力，在相应的横向通道部位设置制振结构(图 2-3-7)。

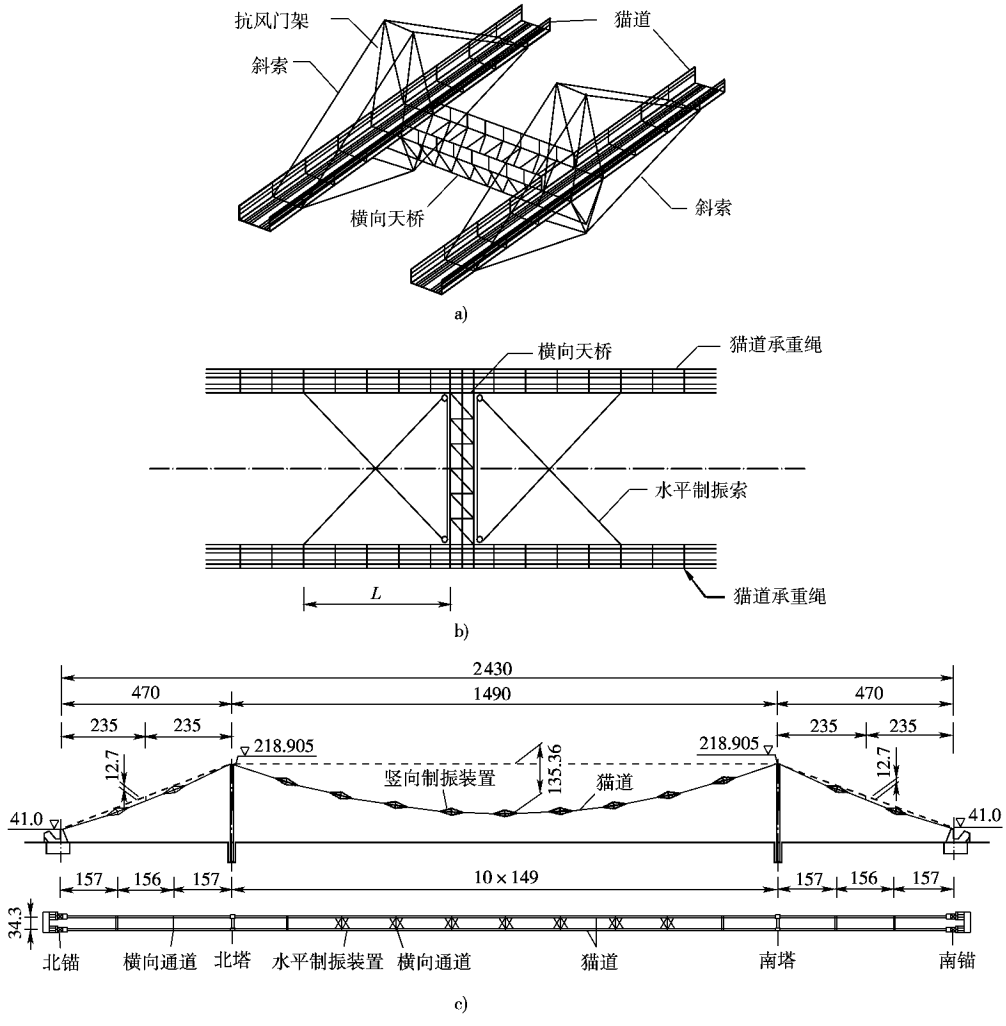


图 2-3-7　润扬长江大桥南汊悬索桥猫道制振结构示意图(尺寸单位：m；高程单位：m)

a)猫道竖向制振装置；b)猫道水平制振装置；c)猫道制振装置总布置图

⑥猫道通过锚固系统锚固在锚碇鞍部预埋件上，锚固系统采用拉杆及锚梁组合结构。承重索垂度调整通过拉杆进行。

(2)连续式猫道的架设

为了不影响通航，中跨猫道承重索采用托架法间接架设，而边跨猫道采用直接上提法架设，并按照上下游对称、中边跨对称的顺序各自单独架设，经主塔塔顶转索鞍，形成三跨连续的猫道系统。

猫道施工流程为：猫道承重索制作→中跨托架承重索架设→托架安装→猫道承重索架设及调整→拆除托架及托架承重索→安装变位刚架及下压装置→猫道面层铺设及横向通道安装→制振系统安装→猫道系统门架安装→系统调试运行。

①猫道承重索制作

首先进行承重索预张拉。为了尽可能地消除承重索非弹性变形，架设前先对其进行预张拉。

其次是浇铸锚头。将预张拉后的钢丝绳在最小破断力 5%的持荷状态下按设计长度精确

下料，然后按灌铸工艺完成锚头灌铸工作，确保灌铸部分实际抗拉力大于钢丝绳最小破断力。

最后进行整绳破断试验。通过破断试验，验证承重索的强度和最小破断拉力值。

②中跨托架承重索架设

如图 2-3-8 所示，每条猫道中跨设置 2 根 ϕ36 的托架承重索，分别临时锚固在塔顶预埋件上，首先将托架承重索放置在南塔边跨侧放索架上，用塔吊将绳头提至塔顶上，并与主牵引索拽拉器相连接，启动牵引系统，放索架提供一定的反张力，将托架承重索由南向北牵引。当索盘内托架承重索剩余 3 圈时，用 10t 卷扬机钢绳与托架承重索锚头连接提供反张力，直至绳头到达北塔塔顶并锚固在北塔预埋件上，然后利用南塔塔顶 10t 卷扬机调整托架承重索到达设计垂度后锚固。解除反拉钢绳与托架承重索的连接，用塔吊将其放回地面。

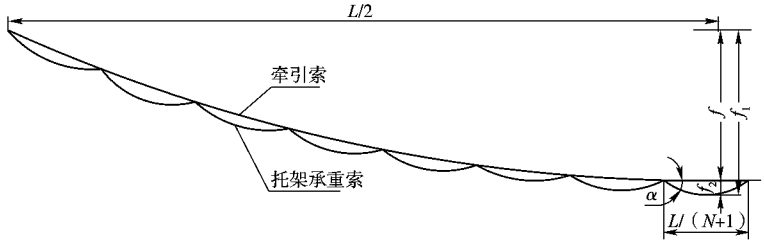


图 2-3-8　托架承重索架设示意图

③托架安装

猫道托架承重索安装完毕，即可进行托架安装。在托架承重索上，用 2ϕ21.5 定位索按约 100m 间距固定 14 个托架。首先将 2ϕ21.5 定位索放置在南塔塔顶横梁放索架上，将 2 根绳头与牵引索拽拉器连接，并向北塔拽拉，当拉出 100m 左右时，在南塔塔顶工作平台上组装托架，把第一个托架挂在托架承重索上，并与 ϕ21.5 定位索连接，当第一个托架被拽拉出 100m 左右时，安装第二个托架，如此反复，直至把定位索拽拉至北塔，将定位索两端分别锚固在预埋件上。

④猫道承重索架设及调整

北边跨承重索架设：北边跨猫道承重索的架设采取直接上提法进行。先将猫道承重索的索盘放在锚碇靠近边跨侧地面上，通过北塔底靠边跨侧的 10t 卷扬机，经地面上的托滚向主塔方向牵拉承重索，当承重索的绳头到达塔底后，利用 10t 卷扬机，将承重索绳头提至塔顶并临时固定。承重索另一端绳头从放索架牵出后与锚碇支墩门架上 5t 卷扬机滑车组相连，待其与中跨承重索连接后上提安装。

中跨和南边跨猫道承重索架设：首先将放置在南锚边跨侧的猫道承重索用南塔底 5t 卷扬机牵拉至塔底，等待与中跨承重索连接。托架承重索及托架架设完毕，开始架设中跨猫道承重索。将 ϕ54 猫道承重索置于南塔底靠边跨侧地面被动放索架上，用塔吊将其绳头提升至塔顶，绕过滚筒后与牵引系统拽拉器相连接，由南向北牵引猫道承重索。当放索架上承重索即将放完时，将塔下 5t 卷扬机绳头与承重索绳头相接，施加一定反力后继续牵拉承重索至北塔塔顶，在塔顶施工平台中跨侧将中跨承重索与边跨承重索连接，解除边跨承重索临时约束，如图 2-3-9 所示。

图 2-3-9　中跨猫道承重索架设

三跨猫道承重索就位：猫道承重索按照北边

跨、中跨和南边跨的顺序依此提升就位。边跨承重索锚头与锚碇支墩处猫道调节拉杆相连，待中跨承重索完全与托架脱离后，利用塔顶 2 台 10t 卷扬机将承重索上提、平移入转索鞍槽内，形成一条完整三跨连续猫道索。同样方法完成其他猫道承重索的安装。猫道承重索横移就位后，对其高程进行测量调整，其顺序是先中跨后边跨。方法如下：

第一步，初调。利用塔、锚门架上卷扬机将承重索的标志点调整到塔和锚相应标志点位置上。

第二步，精调。首先进行中跨猫道承重索调整，用全站仪实测中跨跨中点的垂度以及跨径，并根据实测温度，计算出各索的调整量，利用塔顶卷扬机调整，直至跨中垂度满足要求后，在塔顶转索鞍处固定并做好标志，同样方法进行边跨承重索的垂度调整，垂度调整精度为±3cm。

第三步，托架及托架承重索的拆除。猫道承重索架设完毕后，进行托架承重索的拆除。

第四步，变位刚架及下压装置的安装。由于承重索的塔顶转索鞍位于主索鞍两侧，要使猫道横断面达到设计要求，需将各索向主缆中心线方向集中，故需安装变位刚架。为了保证猫道线形与主缆线形一致，在中跨靠塔部位设置下压装置。变位刚架及下压装置的安装在猫道承重索垂度调整完毕后在塔顶工作平台上进行。

猫道面层铺设：猫道面层采用下滑法铺设，在地面将组成猫道面层的各种材料，如防滑木条、粗面层网、横梁等按设计位置绑扎好，用塔吊将其吊至塔顶工作平台上。

首先在南塔中跨侧安装横向通道，北塔中跨侧安装配重，利用横向通道桥及配重块自重带动面网下滑。由于塔顶两侧坡度较陡，为控制面网下滑度，在塔顶门架上布设 10t 卷扬机进行反拉。当面网下滑至坡度平缓地段，利用自重不能下滑时，此时则利用南侧的横向通道及北侧的配重块形成导轮对牵装置，利用拽拉器牵拉绳头由南向北拉动面网下滑，直至滑中合龙。面网铺装完毕后，从塔顶往中跨紧固 U 形螺栓，固定面层。随后完成猫道扶手索、栏杆以及侧面网的安装工作。

边跨铺设采用相同的方法自塔顶向锚碇处进行下滑铺设，直至铺完整个边跨猫道。为了减小主塔的不平衡受力，先从塔顶向中跨铺设 200～250m 后，再从塔顶向中、边跨同时进行对称铺设，尽量使面网铺设速度保持一致。

猫道面网铺设时定期观测主塔的扭转和偏位。

横向通道安装：在猫道面层铺设过程中，在塔底拼装横向通道，根据其在猫道上的具体位置适时利用塔吊提升至塔顶进行安装，随同面层一起下滑。

施工中应注意左右、边跨、中跨的作业平衡，并对桥塔的变位进行严格的检测，以防猫道异常使桥塔产生较大变位，给主缆架设带来不良的影响。

3. 猫道的抗风稳定性分析简述

以往许多悬索桥的施工猫道都采用设置抗风缆的措施，这种方案一般抗风安全性问题不突出。当采用无抗风缆的猫道方案时，抗风安全性和减小振动的问题就比较重要。危及猫道抗风安全性的主要因素是结构的抗风稳定性。关于猫道抗风稳定性的评估方法主要有 2 种：利用猫道整体模型，通过风洞试验直接考察抗风稳定性；猫道节段模型测量风力系数与数值模拟计算相结合的方法。第一种方法虽能全面反映结构在风荷载作用下的静力、动力及几何非线性行为，但对于大跨度悬索桥施工猫道而言，风洞尺寸必然较大，费用也较高。第二种方法，可采用尺寸较大的模型，能够较为精确地测量猫道承受的风荷载，采用非线性有限元法对猫道抗风稳定性进行数值分析具有较好的精度，可以基本满足抗风稳定措施的研究的需要。考虑风向与桥轴正交状态时可仅测量静力三分力系数，如要考虑非正交的状态时，应测量其静力六

分力系数。施工猫道的静力失稳检验风速应小于发生静力失稳的临界风速。

第二节　主缆架设

主缆架设主要有空中纺线(AS)法和预制丝股(PPWS)法。前者多在美国和欧洲等地采用,后者多在中国和日本等亚洲国家采用。国内外部分悬索桥牵引系统形式,如表 2-3-5 所示。

AS 法的特点是主缆钢丝逐根或几根(一般最多 4 根)牵引,然后编束,相对于 PPWS 法而言,所用牵引机械动力较小,而且可以编成较大的索股,因而锚头数量可以少些,但其设备一次性投资较大,而且制缆的质量相对 PPWS 法差些,空中作业时间也相对较长。

PPWS 法的特点是空中作业时间相对 AS 法较短,制缆质量也较高,但牵引系统所需动力相对较大。

国内外部分悬索桥牵引系统形式　　表 2-3-5

序号	桥　名	主跨(m)	主　缆					
			构成(PPWS)	直径(mm)	长度(m)	单根索股质量(t)	牵引系统	牵引方式
1	汕头海湾大桥	452	110×91×ϕ6	ϕ560	1029	15.0	小循环	轨道
2	广东虎门大桥	888	110×127×ϕ5.2	ϕ687	1634	34.6	往复	门架
3	西陵长江大桥	900	110×91×ϕ5	ϕ550	1530	30.6	小循环	轨道
4	江阴长江大桥	1385	171×127×ϕ5.35	ϕ897	2200	50.0	往复	架空索道
5	厦门海沧大桥	648	110×91×ϕ5.1	ϕ570	1228	17.8	往复	门架
6	宜昌长江大桥	960	104×127×ϕ5.1	ϕ655	1574	32.1	往复	门架
7	日本明石海峡大桥	1990	290×127×ϕ5.23	ϕ1122	4071	87.1	双单线往复	门架
8	日本白鸟大桥	720	52×127×ϕ5.2	ϕ470	1620	34.0	小循环	门架
9	润扬长江大桥	1490	184×127×ϕ5.3	ϕ906	2600	58	双线往复	门架

一、空中纺线(AS)法

空中纺线法是用纺轮在两端锚碇的靴跟间将钢丝反复绽放成环状的一束,然后再将数十

图 2-3-10　AS 法纺轮作业

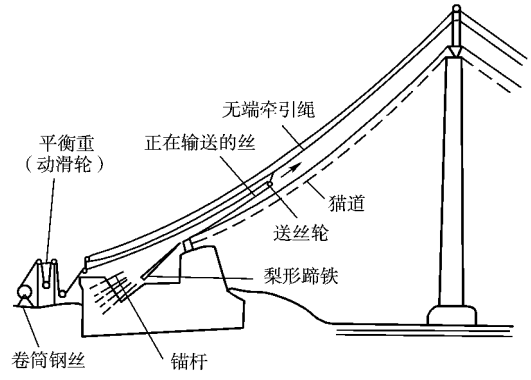


图 2-3-11　AS 法送丝工艺示意图

束捆扎成一根主缆。如图 2-3-10 和图 2-3-11 所示。纺轮每次可带 1 根钢丝，也可带几根，最多可带 4 根钢丝。

送丝小车的最高时速为 4m/s，按照预定的次数送丝后，再进行捆扎作业，每束钢丝的数目应考虑锚碇固定面积和调整钢丝束的能力决定，如日本的下津井濑户大桥的每束钢丝束的丝数为 552 丝。

二、预制丝股(PPWS)法

预制丝股法是在工厂将钢丝束制成束用卷筒运至桥位安装在一侧锚碇的钢丝松卷轮上，通过液压无级调速卷扬机用拽拉器将钢丝束一端吊起拉向对岸 。

钢丝束的张拉、移设就位、固定作业和调整作业对每束钢丝束都要进行，最后用紧缆机将钢丝束挤紧为圆形成为主缆。

每股钢丝束的丝数约为 100 余根(单数)，如日本的关门桥和南备赞濑户桥分别为 91 丝和 127 丝，我国的润扬长江大桥南汊悬索桥主缆束股为 127 丝。

已建成的几座有代表性悬索桥的主缆架设牵引系统如下：

明石海峡大桥由于索盘与卷扬机放置一边，索股牵拉时，由于跨径大，导轮组、托滚放置较多，因而产生较大摩阻力。因此在放索区采用大吨位卷扬机，同时在对岸一侧转向轮还增加了驱动装置，以提供足够的驱动力(图 2-3-12)。

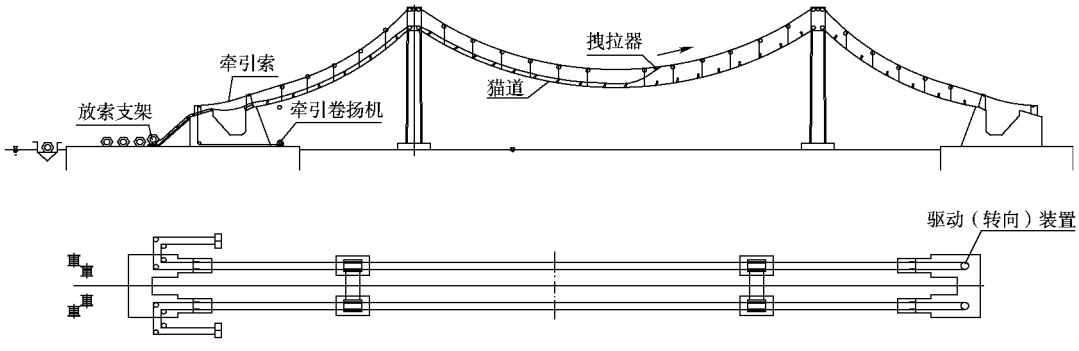


图 2-3-12　日本明石海峡大桥牵引系统

江阴大桥采用架空索道牵引系统，结构简单、造价低，但由于轨道承重索在鞍部和主鞍的门架上方，需利用辅助设施，手拉葫芦进行锚头承载转换，耗时较多，影响索股架设速度(图 2-3-13)。主跨 1385m，索股牵引过程中轨道承重索受力发生变化时，前锚头与猫道之间距离会时高时低，需专人跟踪前锚头，不断调节倒链葫芦，防止锚头承载架碰坏托滚，增加了作业危险性，制约了牵索速度。

海沧大桥由于跨径相对较小[230＋648＋230(m)]，适合采用单线复式牵引系统，采用拽拉器连接锚头运行于门架导轮组之间(图 2-3-14)。

比较上述各种牵引系统可知，门架式牵引系统施工安全、作业效率较高；往复式牵引方式牵引效率高、能耗低。因此，润扬长江大桥采用门架式牵引系统，双线往复牵引方式架设主缆索股，如图 2-3-15 所示。

一般牵引索的行进速度最高为 30～40m/min，钢丝束沿固定在猫道上的辊轮前行，在离鞍座 20m 处安装钢丝束就位用的卡子，用油压装置将其移设于鞍座的预定位置。接着用起重

机将钢丝束端部的锚杯端头吊起，并用安装在锚碇上的卷扬机张拉固定在锚碇上。以润扬长江大桥为例，具体工艺如下：

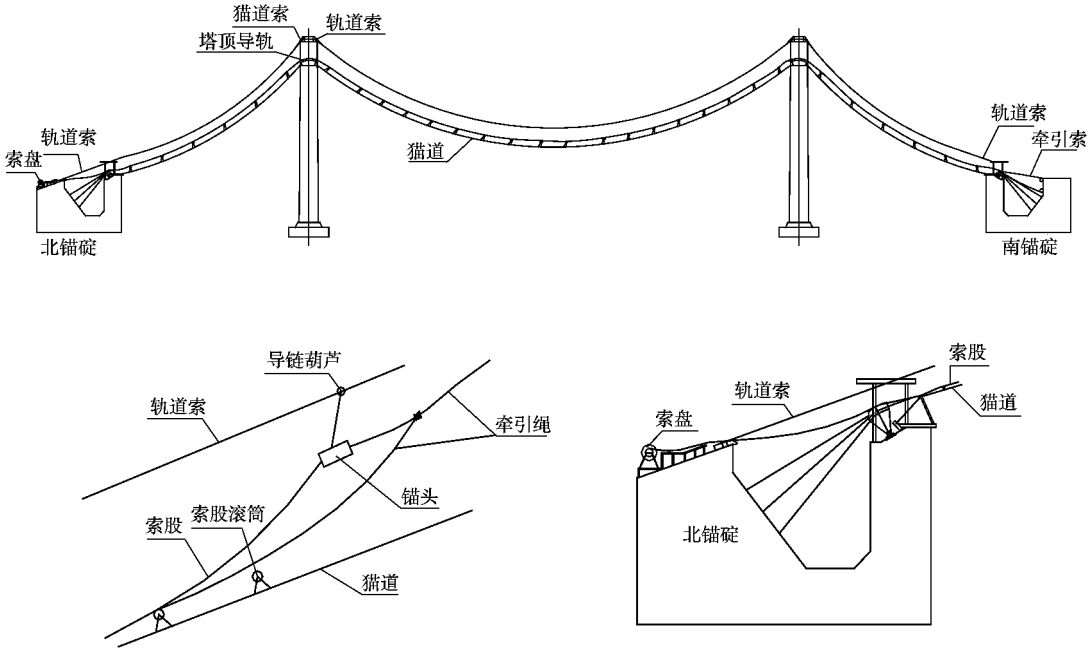


图 2-3-13　**江阴长江大桥牵引系统**

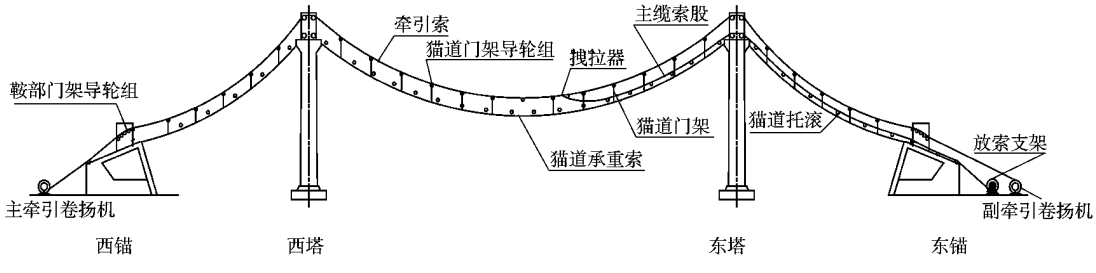


图 2-3-14　**厦门海沧大桥牵引系统**

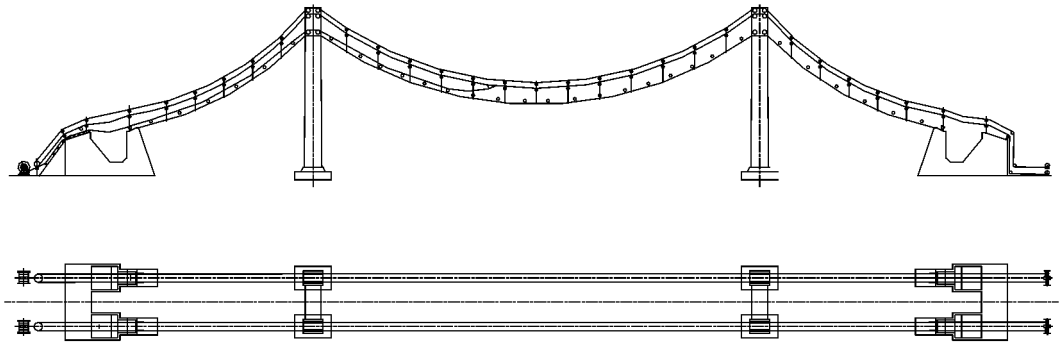


图 2-3-15　**润扬长江大桥牵引系统**

1. 牵引系统及机具布置

如图 2-3-16 所示，将 JKB25 牵引卷扬机布置在北岸锚后的地面上，放索机构布置在南锚后的地面上。在放索架和后锚块之间搭设斜向贝雷支架作为索股上锚通道。

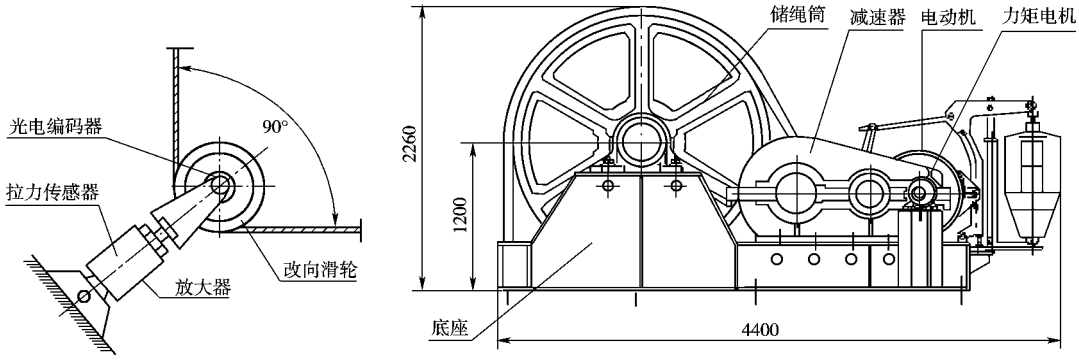


图 2-3-16　润扬长江大桥主缆牵引卷扬机(尺寸单位：mm)

索股架设前，施工现场应存放一定数量的索股。根据南锚场地情况，在南锚东侧设置面积约 3900m² 的场地作为存索区，存索区内布置 1 台 80t 龙门吊机，以满足场内运输装卸的需要。南锚锚后为放索区，放索区内设置 1 台 80t 龙门吊机装卸索股索盘，在龙门吊机轨道范围放置 2 套放索支架，以保证上、下游侧同时进行放索作业。

塔顶和散索鞍支墩顶部各放置一定数量的 5t 和 10t 卷扬机进行辅助作业。

2. 主缆索股牵引

润扬长江大桥每根主缆共 184 束索股，从 1～184 的编号顺序架设，首先架设 1 号基准索股，待基准索股线形调整完成后半，再依次开始一般索股架设。

索股架设前，先将待架设的基准索股从存放区运至放索区内，利用锚后 80t 龙门吊机安放在放索架上(图 2-3-17)，拉出索股前锚头，用专用连接器将索股锚头与牵引系统拽拉器连接，检查拽拉器并调整好平衡锤，保持在牵引过程中拽拉器的平稳，然后启动 25t 牵引卷扬机进行索股牵引作业。牵引过程中同一牵引系统的 2 台卷扬机应保持同步运行，收放速度一致，被动

图 2-3-17　润扬长江大桥主缆牵引被动放索机构

卷扬机保持一定的反拉力。索股牵引速度一般控制在 20～30 m/min，在过塔顶门架、锚碇门架及猫道门架时，适当降低牵引速度，减小拽拉器对门架的冲击力。当索股前锚头接近北锚前锚室时，将已从南锚锚后放索架索盘上脱出的后锚头装上专用的托板小车，然后继续牵拉，最后用塔吊辅助将锚头放入前锚室适当位置。

索股架设过程中，在散索鞍支墩顶、塔顶、猫道上，均安排人员监视看护索股牵引状况，若发现索股扭转、散丝、鼓丝、缠包带断裂等情况，及时纠正或处理，以确保索股架设质量。索股架设时，原则上，上下游 2 根主缆应基本对称施工。

3. 索股整形入鞍

当索股牵拉到位后，利用放置于锚碇门架和塔顶门架上的 10t 卷扬机进行索股的上提、横移和整形入鞍。在距离主索鞍前后各 20m 的地方和散索鞍前 20m、鞍后 10m 左右的位置处，将索股握索器安装在主缆索股上，拧紧握索器上的夹紧螺栓，确保主缆索股与握索器不产生相对滑移。卷扬机钢绳经动、定滑车组绕先后与握索器相连组成提升系统。待全部握索器和提升系统安装完毕后，起动塔顶门架和锚碇门架上的卷扬机，将整条索股提离猫道托滚，同时利用门架上吊挂的手动葫芦，将散索鞍支墩顶和主塔处索股提离索鞍处托滚，此时，索鞍前后两握索器之间的索股呈无应力状态，在此状态想将该索股渣整形入鞍。由于索鞍的鞍槽为矩形，所以在入槽前应将六角形的索股整成矩形。

开始整形前，在距离索鞍前后约 3m 的地方，分别安装上六边形夹具，解除两夹具间索股的绑扎带。从边跨向中跨方向进行整形，边整形边人工用木锤敲打索股，并用钢片梳进行断面整理，使其成为四边形，再用专用四边形夹具夹紧，待主、散索鞍处索股全部整形完毕后，将该索股置入主、散索鞍相对应的索槽内。索股入鞍的顺序为：塔顶处由边跨侧向中跨侧，散索鞍处由锚跨向边跨方向依次将索股放入鞍槽里的位置，以确保索股不发生扭转。为防止已经入鞍的索股挤压隔板使其变形，应在其他鞍槽内填塞楔形木块。索股入鞍后，调整索股上的标记点与设计位置相吻合，并适当调整索股垂度，防止索股间相互挤压。索股入鞍完成后，将索股两端锚头与该索股相对应位置的锚固系统通过拉杆相连，将索股临时锚固。

主缆索股调整分为基准索股调整和一般索股调整。索股调整要求在风速较小、温度稳定的夜间进行。基准索股垂度调整方法采用绝对高程法，一般索股垂度调整采用相对基准索法进行垂度调整。索股各跨垂度调整完成后，用拉伸器调整锚跨张力。当索股架设到一定数量后，为便于各索股的有序排列和保持其形状，应及时安装索股形状保持器。

主缆索股架设完毕后，在主、散索鞍鞍槽顶部填压锌填块，安装索鞍紧固拉杆，并将拉杆张拉至设计吨位。

4. 主缆架设可能出现的问题的解决办法

(1)由于索盘转动惯性引起的“呼拉圈”现象。为了克服这种现象，可采用组合式被动放索支架，使索股在架设的过程中，始终保持一定的反拉力。

(2)索股牵引过程中的散丝现象。其解决办法有以下三个方面：

①保持放索速度与牵引速度一致，在索股牵拉期间，主缆索股始终保持一定的张力，避免索盘上的索股松散、下垂、磨损而导致散丝。

②加密塔顶、散索鞍支墩处的托滚，在不影响索股横移入鞍的前提下，尽可能增大塔顶、散索鞍支墩处索股滚筒所组成的曲线的竖向曲率半径。

③全部采用尼龙托滚，对索股缠包带有较好的保护作用，防止缠包带断裂造成的散丝。

(3)主缆牵引过程中的扭转现象。其解决办法有以下五个方面：

①猫道设计时，合理分布猫道承重索的间距等，尽可能减小猫道倾斜。

②将牵引系统设计成双线往复式。对称于猫道布置，调整牵引系统大小导轮组位置，并通过调整拽拉器平衡锤位置，使拽拉器与索股支承托滚保持在同一竖面。

③拽拉器与索股锚头之间采用刚性连接。

④主缆索股断面为六角形，因此将托滚锥角设计成 60°，牵引过程中索股贴靠边缘，可以保持一个面接触，以避免托滚形状造成的影响。

⑤在索股上安装鱼雷夹具，内为六边形断面，与索股的断面尺寸一致。鱼雷夹具每隔 300m 安装一个，安排一个工人跟踪控制，防止发生扭转。

(4)索股牵引过程中产生的“鼓丝现象”。为解决这一问题，注意以下五个方面：

①确定合理的整形入鞍工艺和顺序。

②在索股牵引过程中，严密监控，杜绝局部钢丝受挂现象。

③确定适度的预提高量，减小索股调整时产生的鼓丝。

④在索股调整时，用木锤在调整部位附近反复敲打，并用手动葫芦适当上提索股，以减小鞍槽摩擦影响。

⑤对于锚跨，将锚跨鼓丝人工赶至边跨侧，远离散索鞍，便于后期恒载增加后达到消除鼓丝的目的。

(5)索股表面的保护措施，有以下五个方面：

①托滚间距选择恰当，适当加大托滚直径，对索股镀锌层有较好的保护作用。

②将握索器及夹具边角打磨成圆角，并增大握索器与主缆索股的接触面积，以降低对索股表面的损伤。

③防止钢丝绳与索股钢丝摩擦造成镀锌层损伤。

④塔顶、锚碇门架处采用尼龙吊带吊挂索股整形入鞍，保护索股镀锌层。

⑤索股表面局部镀锌层出现损伤，立即按照要求涂抹富锌环氧漆修复。

三、AS 法和 PPWS 法的比较

AS 法所用的机械设备能力较小，但施工速度较慢。PPWS 法则相反，所用的机械设备能力较大，而施工速度则较快，作业精度也较高。

AS 法多在欧美等国使用，日本近年来也有采用。我国广东虎门大桥、汕头海湾大桥、江阴长江大桥、厦门海沧大桥，日本的明石海峡大桥等都用 PPWS 法架设加劲梁。PPWS 法的牵引，如图 2-3-18 所示。

图 2-3-18　PPWS 法架设主缆的牵引作业

四、钢丝束垂度的调整

无论是 AS 法还是 PPWS 法，在刚架好时与两锚碇间的钢丝束的垂度应比设计垂度高出 200～300mm，然后应在股线的表面温度和内部温度无差别的夜间，进行垂度调整作业使其符合设计要求。

垂度调整时，应先将最初架设的束作为基准，用此基准束调整以后架设的垂度。基准束的调整用激光仪器测其垂度，并同时进行桥塔倾斜量、基准束的表面温

度以及左右主缆基准束高程的测量。这种测量每夜 3 次，连续 3 夜进行。

在索股调整时，除底部 3 排索股采用 1 号基准索股（最初架设的束）进行高差测量外，其余索股高差测量一般选用同排或底下一排最外侧索股为基准索股。这样做是因为 1 号基准索股因受到其上边已调整好的索股（处于已架好的索股内部）因升温下垂产生的压力，已经不宜作为基准索股，而同排或下一排的索股则不存在这个问题，从而可以减少误差。

钢丝束的测定逐股单独进行，测定其和基准束的垂度差后进行调整，这时应确认测定的束和基准束无温度差，并应确认要测定的束和其他束不接触。

在钢丝束的架设过程中，由于基准束可能发生变化，所以要对其进行数次的测量。

五、主缆丝股锚跨张力的合理控制值确定

按基准温度设定的索鞍预偏量一般只能保证在基准温度下，主索鞍两侧的水平力相等，散索鞍两侧的张力相等。当施工过程中，温度与基准温度不一致时，各跨的索力将随之变化。由于边跨与锚跨的索长相差较大，温度变化对边跨和锚跨的张力的影响很大，在散索鞍处，索力差超过一定后，可能导致丝股滑动，因此需要研究控制。

1. 边跨和锚跨因温度变化引起的索力改变计算

索长增量与垂度增量的关系式近似为：

$$\Delta f = (3\ l/16\ f)\ \Delta s \tag{2-3-1}$$

式中：Δf——垂度增量；

l——跨度；

Δs——索长增量。

只考虑温度变化影响时：

$$\Delta s = \alpha_t \cdot \Delta t \cdot s \tag{2-3-2}$$

式中：α_t——钢丝的温度线膨胀系数；

Δt——温度增量；

s——索的长度。

将式(2-3-2)代入式(2-3-1)得：

$$\Delta f\ /\Delta t = (3\ l/16\ f)\ \alpha_t\ s \tag{2-3-3}$$

水平分力的增量为：

$$\Delta H = -\ ql^2/8f^2\ \Delta f \tag{2-3-4}$$

则：

$$\Delta H/\Delta t = -\ 3ql^3/(128f^3)\alpha_t\ s$$

对于锚跨，由于矢高 f 太小，按上述公式计算误差较大，宜改用两端固定的直杆计算，即按 $\Delta T = EA\alpha_t\Delta t$，$E$、$A$ 分别为索的弹性模量和截面积。

按照以上两式计算边跨和锚跨单位温差的索张力增量，再乘以实际的温差值，就可比较得出边跨和锚跨的索张力差，并与摩阻力相比较，即可知道索丝股是否会滑移。

2. 索丝股在鞍槽中的摩擦力计算

通过散索鞍的主缆两端的张力一般是不相等的。当其差值大于索与索鞍间的摩擦力时，索股就会发生滑动，所以施工中必须控制散索鞍两端的索力差不致在鞍槽中滑动。

按我国行业标准《公路悬索桥设计规范》（报批稿），鞍槽内索股抗滑安全度：

$$K = \frac{\mu\alpha_S}{\ln(F_{Ct}/F_{Cl})} \geqslant 2$$

式中：μ——索股与槽底或上层索股与下层索股间的摩擦系数，一般取 0.15；

α_S——主缆（索股）在鞍槽上的包角；

F_{Ct}——主缆（索股）紧边拉力；

F_{Cl}——主缆（索股）松边拉力。

若考虑临界状态，取 $K=1$，则：

$$F_{Cl} = F_{Ct}e^{-\mu\alpha}$$

$$F_{max} = F_{Ct}(1-e^{-\mu\alpha})$$

在索股架设过程中，散索鞍的拉杆没有放松，作用于散索鞍的摩擦力不能使散索鞍保持稳定之前，锚跨的丝股拉力一般要进行温度修正。采用一次张拉到位的施工方法，温度修正的目的是保证锚跨丝股的无应力长度与设计相符。不采用一次张拉到位的方法张力锚跨丝股时，可不进行温度修正，但要控制锚固时的张拉力的大小，以保证丝股不会在鞍槽中滑动。

六、主缆紧缆作业

其作用是使主缆成为孔隙率约为 18%～20%的圆形断面，并用软钢带将主缆捆紧。其作业如图 2-3-19 所示。

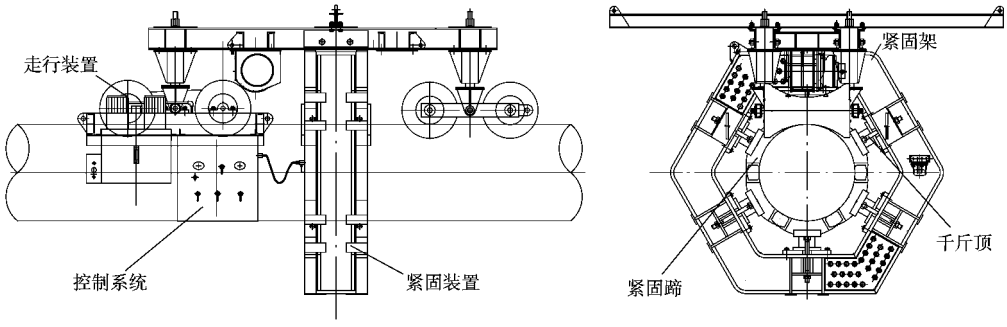


图 2-3-19　主缆紧缆机示意图

1. 紧缆机的主要技术参数

以润扬长江大桥为例，紧缆机主要技术参数如下：

(1)适用主缆直径：ϕ800～ϕ1000mm；

(2)挤紧后缆索空隙率：$K \leqslant 18\%$；

(3)液压千斤顶台数：6 台；

(4)紧固能力：6×2000kN；

(5)液压系统最大压力：$P_{max}=70$MPa；

(6)紧固蹄宽度：250mm；

(7)行走机构：牵引力 5t，速度 1.5m/min；

(8)总质量：7.8t。

2. 紧缆机技术特点

(1)紧缆机反力架结构由以往的 12 边形的铸钢机体改成 6 边形焊接机体，使加工工艺大为简化，机体结构更为合理，不仅减轻了机体自重，而且提高了机体的强度和安全性。

(2)在机架与紧固蹄之间设限位器，可以自动控制液压千斤顶行程，保证了主缆成形质量。

(3)液压系统采用两套高、低压泵可单独或并联使用。高低压泵工作压力工作时可自动转换，加大了千斤顶顶伸速度调节范围，更加切合和满足紧缆施工工艺实际要求。

(4)主缆紧缆机采用模块化设计和制造，单件质量轻，便于制造、运输与拼装，紧缆施工前后紧缆机的组装与拆卸均用塔吊和缆索吊来完成。

(5)移动装置台车轮为 MC 尼龙结构，移动时不损伤主缆表面；在降低重心基础上设防倾装置——平衡吊梁。平衡吊梁两端用钢丝绳与猫道门架承重绳通过滑车连接，防止紧缆机左右摆动，以增加运行稳定性。

(6)主缆紧缆机采用模块化设计和制造，单件质量轻，便于制造、运输与拼装，紧缆施工前后紧缆机的组装与拆卸均用塔吊和缆索吊来完成，如图 2-3-20 所示。

(7)该紧缆机的设计，除适用润扬长江公路大桥主缆紧缆施工外，经适当更换部分构件，可适用于主缆直径在一定范围内的主缆紧缆施工需要。

润扬长江大桥主缆紧缆后主缆为圆形，直径为 895mm(索夹处)和 906mm(索夹间)。主缆紧缆前后的截面比较，如图 2-3-21 所示。

图 2-3-20　紧缆机安装作业

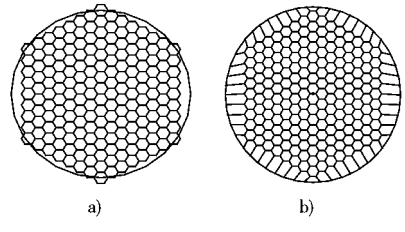


图 2-3-21　主缆紧缆前后的截面比较
a)紧缆前；b)紧缆后

七、主缆索夹安装

用平板车将索夹运至预定位置安装后上紧螺栓，如图 2-3-22 所示。随着加劲梁的架设、恒载的增加，主缆直径会减小，索夹发生松动，因此在加劲梁架设前后、主缆缠丝前要进行数次索夹重新上紧作业。

图 2-3-22　主缆索夹安装作业

八、吊索安装作业

吊索根据其长度不同，卷在木制或钢制卷筒上吊运至塔顶解开，用托架运至预定位置，并在猫道上开孔，将吊索钢丝绳穿过徐徐放下，然后将吊索钢丝绳跨挂在主缆索夹上。

九、缠索作业

为了主缆防锈，需用缠丝机在主缆上紧缠镀锌钢丝，将主缆完全封闭起来。

缠丝分为圆形钢丝和 S 形钢丝两种。圆形缠丝机一次可同时缠 2 根钢丝，一分钟可缠 20

多圈。缠丝作业如图 2-3-23 所示。S 形缠丝机每次也可同时缠 2 根钢丝，每分钟最快可缠 30 圈。S 形钢丝缠丝机作业，如图 2-3-24 所示；主缆 S 形钢丝缠丝断面，如图 2-3-25 所示。

根据国内外悬索桥的施工实例，缠丝的开始时间可在桥面铺装之前或之后，关键是要根据缠丝后主缆的缆径变化合理确定缠丝机的张力。依据日本悬索桥的施工经验，主缆张力达到 70%后即可开始缠丝作业。国内外已经施工的大跨悬索桥的缠丝张力约在 2～2.8kN 之间，不管采用多大的缠丝张力，最终要求缠绕在主缆上的钢丝在主缆达到设计恒载时，钢丝的残余张力大于 0。

1. 缠丝的一般作业顺序

缠丝顺序可根据工程的具体情况决定。有的是为了作业人员熟悉缠丝机的性能，先施工比较平坦的中跨主缆，后施工边跨主缆。中跨主缆由跨中向主塔方向缠绕，边跨由靠近散索鞍部位的主缆开始向塔顶方向缠绕。这种由低向高的缠绕顺序便于控制缠丝机的平衡和缠丝的间距。对于已经熟悉作业的施工队伍，可先缠边跨，后缠中跨，其中缠绕行进方向与前述顺序一致，即由低向高。

图 2-3-23　圆形缠丝机作业

图 2-3-24　S 形钢丝缠丝机作业

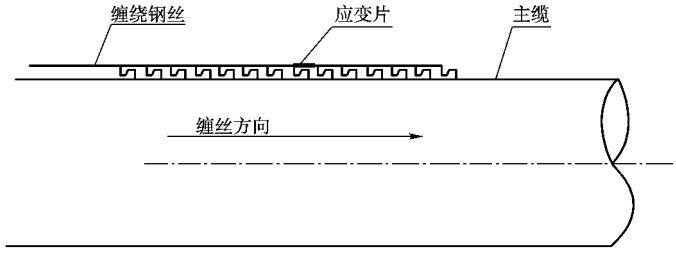


图 2-3-25　主缆缠丝 S 形钢丝断面

2. S 形缠丝机的缠丝作业程序

(1)储丝机绕丝：按每个索夹区间精确计算钢丝用量并成卷供应，缠丝前通过特制绕丝机以一定张力将 S 形钢丝卷转绕至储丝轮上备用。

(2)缠丝试验。将缠丝机安装在主缆上后，进行安装保养调试（加润滑油或润增剂）后，进行空运转试机，调整缠丝机齿圈转动及前移电机变频器，使齿圈转动速度与前行速度匹配。

进行缠丝试验主要是为了检验缠丝机的性能及焊接强度，并确认以下标准：

①缠绕钢丝相互之间无间隙。

②无重叠缠绕、交叉缠绕(乱丝)。

③缠丝表面光滑。

④焊点焊接强度要确保剪切强度在缠绕钢丝的张力之上。

(3)正式缠丝作业。其主要工艺包括:在索夹前起始段人工挤压缠丝、索夹间节段缠丝及行走、缠丝机过索夹、缠丝焊接、尾端手动缠丝等。

①索夹前起始段人工挤压缠丝。其具体过程是:

储丝轮安装完毕,穿绕钢丝,使出丝轮端部距索夹面间距为 20 mm。

将缠丝机转速调整为最慢速。

用钢丝钳将缠丝丝头扭挂在索夹螺杆上。

缠丝机点动 3 圈后停机,切除多余钢丝,人工用木锤、尼龙棒将钢丝推入索夹端部,钢丝与索夹用尼龙楔固定。

回退缠丝齿圈至出丝轮与缠绕钢丝平行,即可进行正常节段间机械缠丝。

②机械缠丝。主缆缠丝使用的缠丝机是可以自行跨越索夹的全节段式。缠丝在 2 个索夹节间进行。其一个周期的缠丝过程为:

缠丝机后端紧靠索夹下端面,前后行走架处于缠丝机前后端机架,缠丝机通过葫芦与猫道扶手索固定。安装储丝轮,后出丝轮出丝在索夹前端起始段开始缠丝。

当缠绕钢丝长度达到 1m 左右时,焊接钢丝并打磨,将钢丝由后出丝轮转至前出丝轮。

松开前后端机架与主缆之间的夹紧装置,缠丝机处于行走模式,卷扬机牵引机架前移,缠丝齿圈相对主缆静止不动(行走齿条向后拨动),就位后固定机架。

储丝轮剩余 6 圈左右并焊钢丝,剪断剩余钢丝,卸去空储丝轮。利用前行走架挂梁更换储丝轮。夹持架前行。

储丝轮由前缠丝轮出丝,钢丝接头与前段钢丝并焊后,继续缠丝。

松开夹持架与主缆夹紧机构,夹持架前行到上一索夹端部(缠丝齿圈相对主缆静止);前行走机构向下移动到夹持架中部,前机架顶升机构千斤顶回索,夹持架前行跨越索夹;前机架顶升机构千斤顶顶升与主缆支撑,前行走机构顶升千斤顶回缩,前行走机构行走跨越索夹后千斤顶顶升与主缆支撑。

缠丝机工作进行索夹区间尾端主缆缠丝、焊接。

③索夹节段尾端手动缠丝。在索夹间缠丝节段的尾部,缠丝机的回转系统如与索夹干涉,在靠近索夹端面的位置,停止机械缠丝,剩余部分以手动缠丝。使用紧线器和夹具等专用工具按以下步骤施工:

用铝热焊剂焊接机械缠丝端部和手动缠丝的起始点;焊接后,用缠绕钢丝在主缆上缠绕 1 周,用紧线器收紧后焊接;多次重复以上作业,使钢丝紧密地缠绕至索夹端面。

④缠绕钢丝的焊接。相邻的缠绕钢丝以铝热焊剂焊接的方式进行接头处理。焊点布置及数量如图 2-3-26 所示,1 个索夹区间焊点分为 3 种:起始点并焊 3 圈,中间点间隔 1m 并焊 2 圈,尾端手动缠丝每圈均并焊,接头处焊接如图 2-3-26 所示。因故停止作业时,迅速将端部 2 点焊接。如临时停止部位的焊接在 1m 间距附近时,该处的 1m 间距的焊接可以省略。

⑤缠绕钢丝连接部位的处理。在储丝轮剩余 6 圈左右时,钢丝并焊后切除多余钢丝。更换储丝轮并焊接头。钢丝接头部位,应使端面相互接触,尽可能无间隙施工。再次缠丝后在接头注入粘缝材料,填埋间隙。

⑥焊点处理。铝热焊点外观呈小丘形,用砂轮机打磨保留 1mm 以上的焊高。

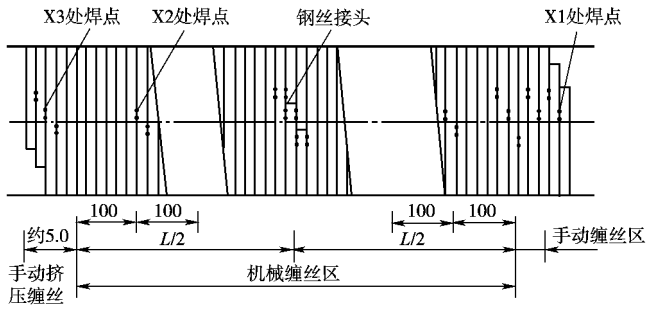


图 2-3-26　**索夹间** 1 **个节段缠绕钢丝的焊接示意(尺寸单位**:cm)

⑦**润扬长江大桥缠丝机的主要技术参数如下**:

缠丝方法:**连续缠丝**;　　**缠丝方向**:**上坡和下坡**;

适用钢丝:S **形钢丝**;　　**缠丝张力**:**最大** 300kg;

钢丝数量:2 **线**;　　**绕线筒能力**:300kg×2 **个绕线筒**;

缠丝转速:1.5～30rad/min;　**缠丝速度**:11.25～225.6mm/min;

移动方法:**齿条式**;　　**走行方法**:2 **卷扬机**;

走行速度:1.3/1.6 m/min　50/60Hz;　**质量**:7500kg;　**倾角**:30°;

控制和监控:**缠丝/移动分离,张力速度同步**。

缠丝机主要技术特点:**主缆缠丝在国内首次采用** S **形钢丝缠绕,缠丝密封效果好,提高了主缆的使用寿命**。

缠丝张力可调,最大张力达 3000N,**满足了"先缠丝后铺装"的新工艺要求,可大幅度缩短施工工期和主缆在空气中裸露锈蚀时间**。

3. **圆形缠丝机的缠丝作业程序**

以下以虎门大桥的缠丝为例。

(1)**缠丝机的组成**

缠丝机主要由主机和牵引卷扬机和控制设备等组成。主机包括支承架、旋转架缠丝筒等。牵引卷扬机包括卷扬机和牵引索。

(2)**缠丝机的主要性能、尺寸和容量**

①**主机**

型号:2 **缠丝筒推进型**;

适用主缆直径:550～750mm;

缠丝张紧力:0～2kN;

缠丝直径:ϕ4mm;

缠丝筒钢丝长度:**正常型筒**——4800mm,**边缘型筒**——2500mm;

缠丝速度:**最大** 25r/min,50Hz,(0～200mm/min);

电源:AC380V±10%。

②**牵引卷扬机**

牵引力:0～30kN(**无级可调张力**);

速度:0～400mm/min(**无级可调速度**);

绳径:ϕ20mm(**经预张拉**);

绳长:25m;

绳端：一端心环固结；

电源：AC380V±10%。

③控制箱

型号：手动遥控型(手动操作控制缠丝速度和牵引速度)；

控制电源：AC100V±10%。

(3)缠丝试验的目的和内容

①缠丝试验的目的，有2个方面：了解缠丝机的机械性能，掌握缠丝机常见故障的处理方法；确定适宜的施工方法。

②缠丝试验的内容，有3个方面：主缆某些特殊位置的缠丝处理办法，如索夹两端、锚碇前墙处等；所缠钢丝的焊接工艺，包括钢丝的固结焊和对接焊；缠丝机过索夹的方法。

(4)缠丝工艺流程

缠丝机的工艺流程为：确定缠丝顺序→缠丝机安装→缠丝前的准备工作→缠丝作业→移机过索夹→点焊丝、打磨。

①缠丝顺序。先缠中跨主缆，后缠边跨主缆；中跨由跨中分别向塔顶方向缠丝(正中间一段空留，以便排水)，边跨由靠近散索鞍部位向塔顶缠丝，这样由低向高的缠丝顺序主要是为了控制缠丝机的平衡和缠丝的间距。

②缠丝机的安装。先将缠丝机牵引架和手动泵装到主机上，打开两侧和下面螺栓，把手动泵方向打到开的位置，让主机张口打开，放到缠丝处索夹前方，后用1t手动葫芦把张口收紧，并把手动泵方向阀打到闭的位置，摇动手柄将主机复位，上紧各处螺栓；再在缠丝前方的一个索夹上安装好电动卷扬机，其牵引绳与主机连接。

③缠丝前的准备工作，具体做到：

一是，清洗主缆加盖防雨布。

二是，在主缆上涂防护漆、涂腻子。涂腻子的长度根据其固化时间和缠丝速度决定，以腻子干并且未完全固化前缠完丝为原则。

三是，做好丝的倒盘和运输工作，即将缠绕在厂制丝卷上的丝倒换在与缠丝机相配的缠丝筒上。缠丝筒上的丝量，以供给一个索夹阶段缠完为宜。

④缠丝作业。缠丝分主缠绕和端缠绕两次进行，先用缠丝机从靠近索夹开始处进行主缠绕(双丝)；缠完后，缠绕不到的两端再用手动缠丝机进行端缠绕(单丝)。机动和手动之间钢丝的连接是用对接焊焊接。

缠丝时必须注意以下几点：

一是，缠丝的起头和结尾必须先固结好后才剪断丝，以防丝崩散。

二是，双丝和单丝的对接处及断丝和换丝时的对接必须牢靠，以保证其具有足够的强度。

三是，手动缠丝机收尾时丝与索夹缝隙的处理要仔细认真。

⑤移机过索夹。中间跨采用缆索吊机移机过索夹的，即用两个1t倒链将缠丝机两端与缆索吊机相连，调整好高度后起吊移机即可。边跨采用轨道板移机过索夹。具体做法是：把具有一定曲率的轨道板垫在索夹上，在缆索吊起重绳和缠丝机上挂两个1t倒链，先收紧倒链，保持缠丝机的横向平衡，再起动自配卷扬机和缆索吊机水平牵引绳，即可将缠丝机牵引过索夹。

⑥点焊丝、打磨。一个节段的丝缠完后，在缠绕的始、终端以及其他部位每隔4m处，用铝热焊进行点焊，焊后的凸起点再进行打磨。为了提高防水和防锈效果，缠丝前要在主缆上涂防锈漆，缠丝后还要涂防锈涂料。

第四章 加劲梁施工

DISIZHANG

悬索桥加劲梁分为钢桁梁、钢箱梁、混凝土箱梁等。以下分别叙述其架设施工。

第一节　钢桁梁加劲梁的架设

一、用移动式起重机或缆索吊机架设钢桁梁加劲梁

本法适用于在短节或单根杆件架设时，类似于连续钢桁梁的架设。其架设作业，如图2-4-1所示。

图 2-4-1　钢桁梁加劲梁架设

1. 按架设单元分类

可分为按单根杆件、桁片（平面桁架）、节段（空间桁架）进行架设的三种方法。

单根杆件架设方法就是将组成加劲桁架的杆件搬运到现场，架设安装在预定位置构成加劲桁架。这种架设方法以杆件作为架设单元，可使用小型的架设机械。但杆件数目多，费工费时，工期较长。

桁片架设方法就是将几个节间的加劲桁架按两片主桁架和上、下平联及横联等片状构件

运到现场进行架设。桁片的长度一般为 2～3 个节间，质量不大，架设比较灵活。

节段架设方法就是将上述的桁片在工厂组装成加劲桁架的整体节段，用船只运至预定位置，然后用较大起吊能力的吊机垂直起吊逐次连接。架设速度快，工期相对较短，但由于一般需从桥下垂直起吊桁段，故需封航或部分封航。

2. 按连接状态分类

加劲桁架在架设施工中的连接方法可分为以下几种。

(1)全铰法

全铰法即加劲桁架各节段用铰连接。这种方法架设施工的主梁反应单纯，但架设过程中抗风性能差，在大跨度悬索桥上一般不用。

(2)逐次刚接法

这种方法是将节段与架设好的部分刚接后，再用吊索将其固定。这种方法架设中刚性大，抗风稳定性好，但架设时在加劲桁架中会产生由自重引起的局部变形和安装应力，需验算其数值并在必要时采取临时措施。

(3)有架设铰的逐次刚接法

这种方法是是前两者的折衷方法，即在应力过大的区段设置减小架设应力的架设铰。

二、用大型浮吊架设钢桁梁加劲梁

如图 2-4-2 所示，利用浮吊将用驳船运来的大块件起吊安装，施工效率高，但受气象、水文条件的影响较大，另外要严格限制船舶的航行。日本等国在海峡桥上多用此法，其浮吊的最大起重量已达 3500t。

图 2-4-2　浮吊架设钢桁梁加劲梁

第二节　钢箱梁加劲梁的架设

一、钢箱梁的制作、运输和定位

钢箱梁一般是在制造车间先制作分解的构件或杆件，如顶板、侧板、横隔板、风嘴角单元和人行道板等，然后运至工地拼装场拼装成梁段，梁段的长度由设计根据情况而定。拼装场根据

桥长、桥宽、工期和吊装、运输条件等综合决定，一般分为梁段拼装区、梁段存放区、办公及仓库区等。为了运输方便，拼装场一般设在靠河边或海边有码头的地方，否则，就要设置码头。

在拼装箱梁时，应先制作板件拼接胎架和总装胎架。总装胎架用于梁段装配的支撑及成形。胎架表面沿横向和纵向预设拱度，施工期间定期检测、调整，以精确获得设计的梁段几何尺寸。

桥面板和桥底板由于面积较大，为了保证制作尺寸，必须预留焊接收缩量。

在钢梁梁段的制作前，为了使结构的内部焊接残余应力最小、焊接变形最小、焊接缺陷最少，必须进行焊接工艺程序设计，并在焊接过程中，根据实际施焊效果不断优化焊接程序。一般来说，应坚持先板件拼接后装配、板件拼接尽量无约束的原则以及能分次拼装就分次拼装、焊接和修正的原则。为避免角单元与梁体焊接后的翘曲变形，可采用预变形工艺。梁段制作好后，先调运、存放在存梁场，再根据进度要求吊运至码头，必要时运输梁段可采用平板运输车运输。

装船码头前方一般应设置搁墩，驳船船头可直接落放在搁墩上，克服装船前期船头下沉，保证驳船稳定。为了避免因水位变化引起的驳船顶面高程的变化，驳船应设水舱，在水位变化时抽水或补水，以调节驳船顶面与码头表面在同一高程上。为克服梁段登船产生的水平作用力，造成驳船离开码头，驳船前方两角用钢丝绳系固于码头上，同时起动拖轮在或驳船自身动力，迫使驳船紧靠码头。

用驳船将梁段运至待起吊位置时，为了能迅速和准确地安装吊具和起吊，一般要根据河床及水文情况对驳船进行临时抛锚定位试验。证明可行后用于正式吊装施工。

二、一般箱梁梁段的架设

钢箱梁和混凝土箱梁的架设一般用缆载起重机，如图 2-4-3、图 2-4-4、图 2-4-5 和图 2-4-6 所示。这种方法对航行的限制小，在水文、气象条件较好的地方效果好，欧美及我国多用此法。

国内已建成的主要悬索桥钢箱梁吊装使用设备，如表 2-4-1 所示。

国内已建成的主要悬索桥钢箱梁吊装使用设备情况　　表 2-4-1

桥梁名称	跨径(m)	梁长(m)/梁重(t)	提升方法	设备情况
广东虎门大桥	888	12/157.5	卷扬机式、液压提升式跨缆吊机	国内研制
厦门海沧大桥	1108	24/312	卷扬机式跨缆吊机	国内研制
香港青马大桥	1377		液压提升式跨缆吊机	英方设备
湖北西陵大桥	900	12.7/110	卷扬机式跨栏吊机	国内研制
湖北宜昌大桥	960	12.06/132.4	卷扬机式跨栏吊机	租用
江苏江阴大桥	1385	32/440	液压提升式跨缆吊机	英方设备
重庆鹅公岩大桥	600		缆索提升	国内研制
汕头海湾大桥	452	5.7/170	卷扬机式跨缆吊机	国内研制
重庆忠县大桥	580		卷扬机式跨缆吊机	国内研制
润扬长江大桥	1490	32.2/492.6	全液压提升式跨缆吊机	国内研制

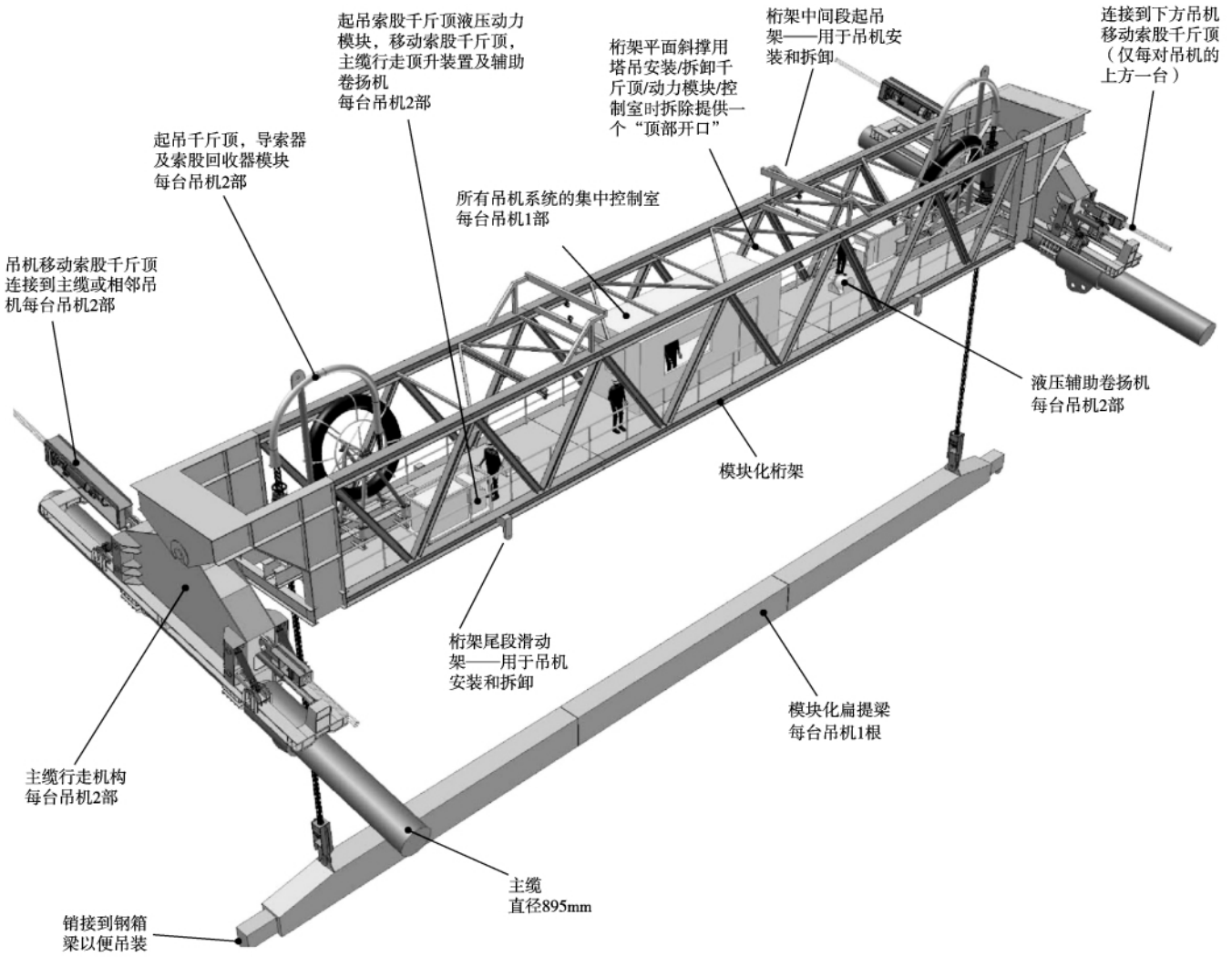


图 2-4-3　**缆载吊机结构图**

润扬长江大桥南汊悬索桥的加劲箱梁截面，如图 2-4-7 所示；其钢箱梁吊装梁段参数，如表 2-4-2 所示。

润扬长江大桥钢箱梁吊装梁段参数表　　表 2-4-2

梁段种类	数量(个)	吊装质量(t)	长×宽×高(m)
标准段	42	492	32.2×38.7×3.024
跨中相邻段	2	506	32.2×38.7×3.024
跨中段	1	321	18.4×38.7×3.024
端段	2	404	25×38.7×3.024

润扬长江大桥采用的缆载起重机主要技术数据如下。

单台跨缆吊机的主要性能指标是：

提升能力：370t；

提升用千斤顶：2×185t；

平均提升速度：36m/h；

最大提升速度 58m/h；

放索速度：58m/h；

提升索股长度：250m；

最大总自重(包括扁担梁)：140t；

允许最大主缆倾角：30°；

主缆上平均行走速度：10m/h；

工作最大风速：16m/s；

非工作状态最大风速：55m/s。

图 2-4-4　缆载吊机吊装箱梁

图 2-4-5　缆载吊机吊装混凝土箱梁

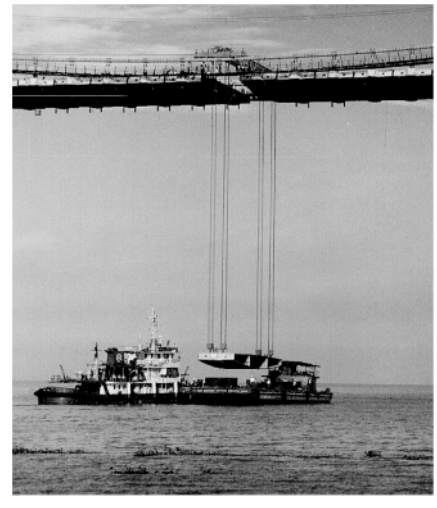


图 2-4-6　缆载吊机吊装混凝土箱梁合龙段

跨缆吊机技术特点如下：

一是，跨缆吊机采用模块化设计，单件模块尺寸小，质量轻，便于制造、运输、安装和保管。

二是，通过更换模块(或局部尺寸调整)即可适用于不同跨径悬索桥钢箱梁吊装施工。

三是，中央控制系统采用计算机控制和智能化设计，所有工作机构的工作状态全部受中央

控制系统监测和控制，自动化程度及同步控制精度高（荷载控制精度5%，伸长量差值控制在10mm以内），提高了设备的安全性和可靠性。

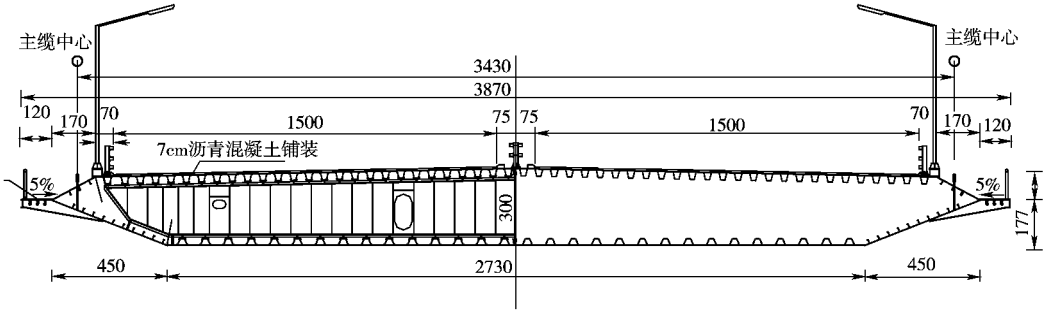


图2-4-7　润扬长江大桥南汊悬索桥的加劲箱梁截面（尺寸单位：cm）

四是，设备质量轻，安全起吊能力大，能适应和满足≤740t的钢箱梁吊装。

五是，跨缆吊机采用一套自备的安装系统提升安装至主缆。该方法既可用于吊机的安装，也可用于吊机的拆除，并可在跨中或在塔根部进行拆除。

1. 跨缆吊机的安装

跨缆吊机在安装前先拆除桁架的两个节间，缩短长度，使它能从两个猫道之间通过，这样可以直接用驳船在跨中安装跨缆吊机，而不是从塔处利用塔吊将吊机安装在塔顶，然后沿主缆下移至跨中。通过锚固在吊机提升托架上的索股千斤顶提升跨缆吊机使其从两条猫道之间穿过，将吊机端节段水平顶出，安装先前拆除的两个节间，吊机便可落放在两条主缆上。安装中，吊机质量全部由提升托架承担，提升用的索股与主缆的临时锚固夹具连接。完成安装后，通过跨缆吊机上的小型索股千斤顶将提升托架落放在停泊在下方的驳船上，托架随后移走。

吊机安装在主缆上后，利用驳船从水面安装起吊横梁，用于梁段起吊。每节梁段的四个临时吊点用销接形式与吊机上的起吊横梁连接，将梁段质量传递到吊机上。

跨缆吊机在主缆上的走行采用“跨步方式”。吊机两端沿纵向各备一台穿心式索股千斤顶，一方面提供吊机沿主缆向上走行的动力；另一方面作为向下走行的限位装置。每台千斤顶有四根钢绞线穿过，钢绞线的一端锚固在上坡的临时夹具上，另一端穿过跨缆吊机后摆放在猫道上。在吊机移动前，启动千斤顶收紧钢绞线，解开吊机工作靴与主缆的连接夹箍，收起工作靴直至工作靴完全悬空，逐渐将吊机荷载转换至滑移导轨靴上，操作吊机沿导轨移动完成半个循环行走过程。重新落下工作靴至主缆上，通过吊机液压系统将导轨向吊机移动方向伸出，完成后半工作循环。

吊机拆除在跨中进行。完成全部梁段吊装之后，将吊机移至跨中，将吊机顶起离开主缆后落放在桥面上的两个支架上，拆除吊机两个节间，将吊机“内缩”至两条猫道内侧，重新安装吊机外端后整体用两台平板拖车运至引桥，拆解成几个部分运走。

在吊装梁段时，一般要求风速在15m/s以下，一般是从中央梁段向两侧对称进行。为了保持桥塔的平衡，根据计算，在吊装过程中要对南北主鞍座实施顶推。

跨缆吊机安装就位后，提升梁段至桥面高度。在梁段荷载逐渐转移到吊机的过程中，主缆会出现漂移现象，梁段也会作纵向移动。为避免荷载转移中，梁段与驳船之间发生过度位移，在驳船纵向定位时，吊机空载下的吊钩与梁段吊点之间留出一定的预偏量。

对于设有中央扣的悬索桥加劲梁，其安装顺序为：先安装中央扣梁段，再对称向塔方向交

替吊装。由于主塔下的梁段是采用跨缆吊机配合荡移安装的，所以箱梁的合龙段一般设在距该梁段几个梁段的部位。

对于不设中央扣的悬索桥加劲梁，其安装顺序一般也是从中向边交替架设。

2. 钢箱梁中央扣梁段的安装

对于大跨度钢加劲梁悬索桥，为了改善跨中短吊索的受力性能及抗弯折能力，一般采用刚性中央扣将主缆和跨中梁段刚性连接，如图 2-4-8 所示。

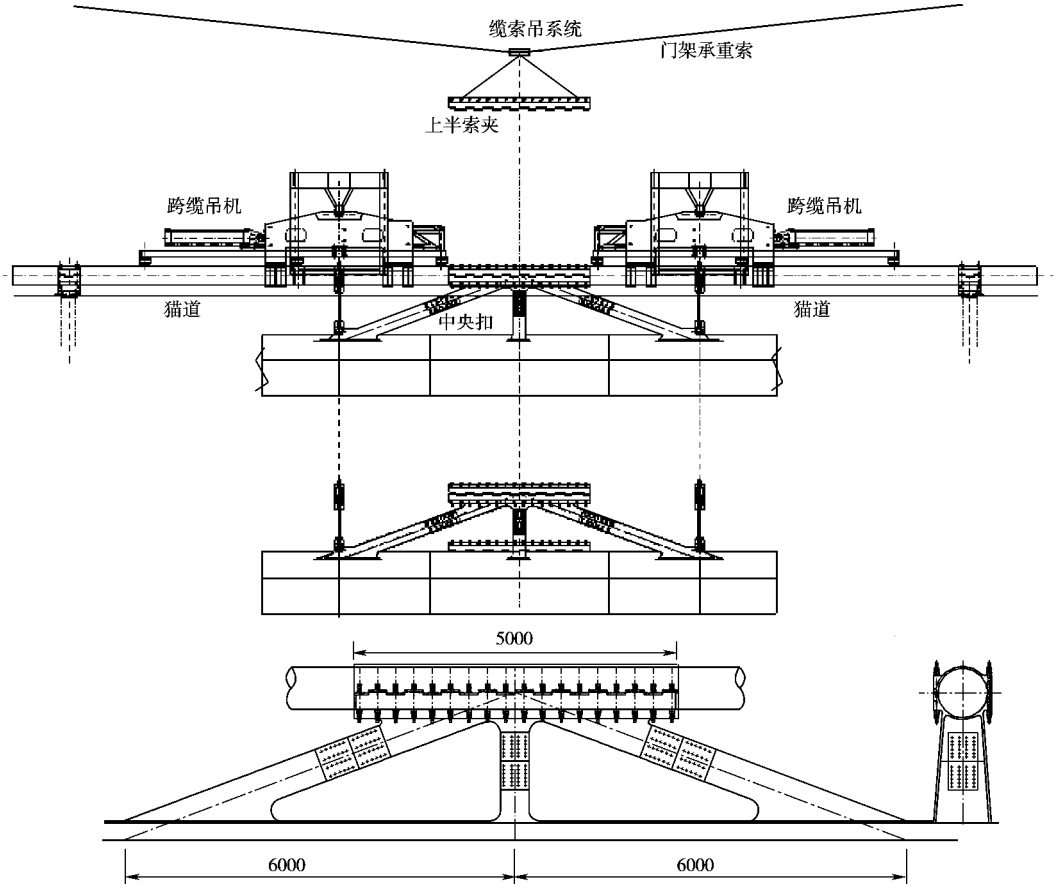


图 2-4-8　悬索桥钢箱梁中央扣安装示意图(尺寸单位：mm)

(1)中央扣梁段的安装技术难点，包括以下两个方面：

①高空漂浮状态下螺栓群的定位连接。

②解决钢箱梁吊装引起主缆线形的变化导致中央扣索夹两端局部应力的增加问题。

(2)中央扣梁段的安装。在中央扣梁段安装前，先将中央扣索夹下半部按照设计要求预先用高强螺栓连接好，随钢箱梁一同吊装，吊装到位后用增设的临时吊杆固定在临时索夹上。待钢箱梁线形基本形成后，再进行中央扣索夹上半部的安装及螺栓的紧固，最后撤除临时索夹和临时吊杆。

临时吊杆采用刚性拉杆，上下各设有一定的螺纹调节长度。由于临时吊杆一般在桥面铺装前拆除，则其所受拉力全部转移到中央扣索夹上，其无应力长度大于或等于钢箱梁合龙时临时吊杆对应位置主缆与梁的理论高差。

设临时吊杆下铰中心距索夹销铰中心的距离为 L_0，主缆中心与中央扣中心位置高差为

L_1，临时索夹主缆中心至临时吊杆索夹销铰中心距离为 L_2，则吊杆上下两铰中心的距离为 $L=L_0+L_1-L_2$，实际的临时吊杆长度比理论长度长 30～40mm。

3. 跨中梁段的相邻梁段吊装

跨中 0 号梁段(或中央扣梁段)吊装完成后，依次吊装跨中梁段的相邻梁段。为了不干扰已架的梁段，一般调整跨缆吊机，使起吊梁段的端头要离开已架梁段约 200mm。

梁段提升至稍高于桥面高程，用水平牵引设备使梁段就位，安装吊索与箱梁永久吊点钢销，然后安装箱梁顶面临时连接件，最后放松跨缆吊具，使吊索受力，即完成该段梁的吊装。

4. 标准梁段的安装

钢箱梁标准梁段的吊装一般分为陆地吊装和水上吊装。

(1)水上梁段吊装

水上梁段吊装一般由驳船运输到待架位置的下方，并利用收放锚绳对钢箱梁进行较精确的定位。一般定位精度要求在 50cm 以内，下放缆载吊机的吊绳，并将其端部连接的扁担梁与钢箱梁段的吊点销接。准备工作完成后，要认真进行安全检查，然后同时起动跨缆吊机起重千斤顶，徐徐将钢箱梁的荷载由驳船转移到吊机千斤顶上。当梁段大部分重力由千斤顶承载后，调整千斤顶油缸行程，同步起动跨缆吊机上的 4 台千斤顶连续提升，迅速将梁段吊离驳船一定距离后，再次检查梁段的水平情况、吊点的连接和吊机的工作情况。确认一切安全正常后，驳船驶离，继续将梁段同步提升到设计高程，并将吊索与梁段锚座相连接。拆除临时吊点，即完成了一个梁段的安装。

依此类推，即可完成水上标准梁段的安装，如图 2-4-9 所示。

(2)陆地梁段吊装

陆地梁段吊装与水上梁装吊装基本一致，唯一不同的是，梁段一般不能在运梁船只上直接起吊，需将梁段运输、安放在陆地的滑移轨道上，然后滑移调整其位置至缆载吊机的垂直下方，即可由缆载吊机起吊安装，如图 2-4-10 所示。

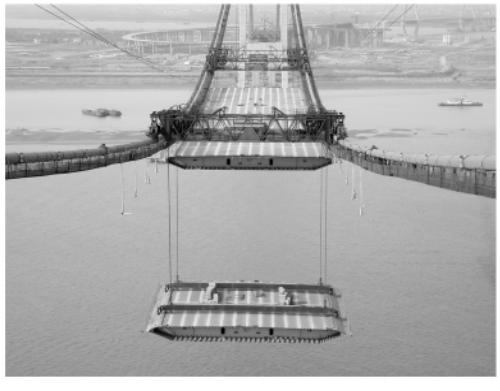


图 2-4-9　水上标准梁段的吊装

图 2-4-10　陆上标准梁段的吊装

5. 端部梁段的吊装

端部梁段指的是部分位于索塔横梁上的梁段。因其无法垂直起吊就位，所以必须采用空中荡移方式进行。吊装前先将钢箱梁竖向支座按要求安装好。

(1)梁段的纵移

端部梁段船运至栈桥前端抛锚定位，用跨缆吊机将梁段从驳船上垂直起吊，使梁段底面略高于栈桥桥面。然后通过索塔承台上步设的牵引装置水平牵引梁段，同时跨缆吊机配合缓缓

放松吊索，把梁段水平荡移放置在栈桥轨道上的移位器上。解除起吊系统与钢箱梁的连接，接着起动安装在塔承台处的卷扬机将梁段牵拉至起点吊位置。

(2)垂直吊装

跨缆吊机上行至端部梁段上方定位，下放吊具与梁段挂接提升。当端梁段起吊高度超出设计高度约 30cm 时，将设在岸侧引桥上的辅助卷扬机钢丝绳栓挂在端梁段的吊点上，起动卷扬机将端梁段向塔方向水平牵拉。同时跨缆吊机吊索下放，维持梁段处于水平状态，缓缓落至竖向支座上，与竖向支座连接并用吊索与其挂接后，放松跨缆吊机的吊索。

对于端梁段处于水上的情况，则直接从驳船上起吊梁段。其余程序与陆地上施工相同。

6. 合龙段的安装

利用布置在引桥上的辅助卷扬机，将靠近塔处的与合龙段相邻的梁段分别向边跨方向牵拉移动约 70cm，按照标准梁段的吊装程序起吊合龙梁段就位。然后放松两段辅助卷扬机，将预偏的梁段恢复到原位，再将合龙梁段向塔侧端面的临时连接杆件连接好，即完成了全部钢箱梁的吊装工作。

7. 临时连接件安装

钢箱梁吊装到位后，梁段之间通过临时连接件相连接，用以承受梁段在架设过程中的轴力和剪力，并保护连接处箱梁顶板不致损坏。临时连接件是由吊装梁段上布置的牵引设备进行位置调整及由跨缆吊机进行钢箱梁的高度调整，在无负荷状态下进行螺栓的紧固。

梁段上部拉杆式的临时连接件的安装，在梁段吊装完成、梁段上缘顶紧间隙闭合后，用手动扳手等进行紧固拉杆螺栓。梁段下部的临时连接件，在钢箱梁吊装初期，梁段下部呈开放状态，在大约 2/3 数量的梁段吊装完成后，跨中梁段间下部间隙开始闭合，止紧板顶紧，将临时连接件连接拉杆螺栓紧固。

8. 索鞍顶推

在钢箱梁吊装期间，根据对索塔允许偏位计算结果，以及对索塔偏位进行的定期监测，通过与索塔允许偏位比较，以索塔偏位为主控目标，经过多次顶推完成索鞍顶推施工，以确保悬索桥在施工期间的安全。

参 考 文 献

[1] 雷俊卿等. 悬索桥设计. 北京:人民交通出版社,2002.

[2] 王武勤. 大跨度悬索桥主缆架设. 施工技术,1998(2).

[3] 钱冬生,陈仁福. 大跨度悬索桥的设计与施工. 成都:西南交通大学出版社,1999.

[4] 铁道部大桥工程局桥梁科学技术研究所编. 悬索桥. 北京:科学技术出版社,1996.

[5] 广东汕头海湾大桥工程总结(下卷). 北京:科学技术出版社,1998.

[6] 杨进,徐恭义. 汕头海湾悬索桥预应力混凝土箱形加劲梁的施工设计. 桥梁建设,1995(1).

[7] 牛和恩主编. 虎门大桥工程(第二册)悬索桥. 北京:人民交通出版社,1998.

[8] 中国公路学会桥梁与结构工程学会. 中国公路学会桥梁与结构工程学会. 2002 年全国桥梁学术会议论文集. 北京:人民交通出版社,2002.

[9] 中国公路学会桥梁与结构工程学会. 中国公路学会桥梁与结构工程学会. 2003 年全国桥梁学术会议论文集. 北京:人民交通出版社,2003.

[10] 中国公路学会桥梁与结构工程学会. 中国公路学会桥梁与结构工程学会. 2004 年全国桥梁学术会议论文集. 北京:人民交通出版社,2004.

[11] 中国公路学会桥梁与结构工程学会. 中国公路学会桥梁与结构工程学会. 2005 年全国桥梁学术会议论文集. 北京:人民交通出版社,2005.

[12] 江苏省长江公路大桥建设指挥部. 江阴长江公路大桥工程建设论文集. 北京:人民交通出版社,2000.

第一章 拱桥概述

DIYIZHANG

拱桥是一种古老的桥式，我国著名的石拱桥——赵州桥，就是体现我国古代建桥水平的杰出代表。近年来，随着建桥技术水平的提高和材料工业的发展，我国拱桥的修建得到了空前的发展，多座创世界记录的桥梁已建成或正在修建。

拱桥的静力特点是，在竖直荷载作用下，拱脚不但有竖直反力，而且还有水平反力，而拱的弯矩则一般很小。通过合理的设计，拱轴主要承受压力，而弯矩和剪力均较小，因而使得拱桥的跨越能力比一般的梁式结构要大得多。

按照拱桥墩台是否承受水平力，可分为有推力拱桥和无推力拱桥（系杆拱桥）；按照拱圈（肋）内是否设铰，可分为无铰、两铰和三铰拱桥。

第一节　拱桥的主要种类

一、石　拱　桥

石拱桥历史悠久，造型美观，经久耐用。根据其用料不同分为片石拱、块石拱或料石拱；根据其布置形式可分为实腹式石板拱桥或空腹式石板拱桥和石肋拱桥。石拱桥的世界最大跨度是我国山西省的新丹河大桥，跨度 146m，如图 3-1-1 所示。

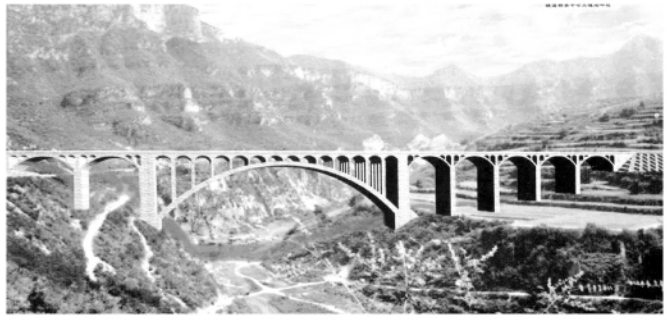


图 3-1-1　山西新丹河石拱桥

石拱桥的主要施工方法是拱架法，主要有竹木拱架、土牛胎拱架、钢拱架和钢木组合拱架、

扣件式钢管拱架以及贝雷拱架和其他常备式组合梁拱架等。对于大跨度拱桥，一般采用钢管拱架以及贝雷拱架和其他常备式组合梁拱架等进行施工。采用拱架施工前要进行认真的方案比选和设计，对拱架施工各个阶段的受力强度和稳定性进行详细的分析计算，根据计算结果并参照经验，进行预拱度设计、加载与落架程序设计。

混凝土预制块拱实质上相当于料石拱。其施工方法可参照前者进行。

二、钢筋混凝土拱桥

钢筋混凝土拱桥是近代发展起来的一种拱桥形式，从拱肋的截面形式可分为钢筋混凝土箱板拱桥、箱肋拱桥、钢管混凝土拱桥等。从结构的立面形式可分为上承式拱桥、下承式拱桥和中承式拱桥。近年来，为了使钢筋混凝土拱桥的跨度更大，采用劲性骨架作为灌注混凝土的模板支承，其最大跨度是我国重庆市的万县长江大桥，主跨 420m，如图 3-1-2 所示。钢筋混凝土拱桥的传统施工方法有拱架现浇或在拱架上组拼预制拱段成拱的方法，为了节省架设费用和提前工期，或者在陡峻幽深的峡谷和深水急流的江河上拱架不易搭设或不经济时，多采用扣索吊挂、缆索吊机无支架吊装的施工方法，或者转体施工的方法进行。对于大跨度钢筋混凝土拱桥，一般采用无支架吊装或转体施工的方法进行施工。

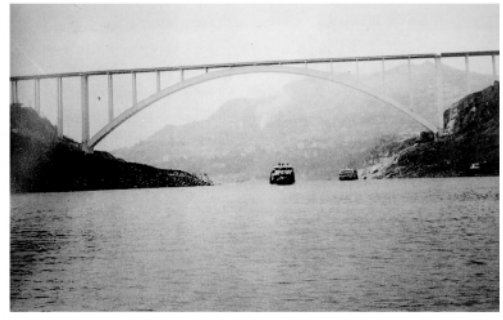


图 3-1-2　跨度 420m 的重庆万县长江大桥

三、钢管混凝土拱桥

钢管混凝土拱桥是近年来发展起来的一种桥式，其由于钢管和混凝土相互弥补了彼此的不足，而发挥了两者的优势，因而可以实现较大的跨越。目前国内钢管混凝土拱桥的最大跨度是重庆市巫山县的巫山长江大桥，主跨净跨径为 460m，净矢跨比为 1/3.8，拱轴线为拱轴系数 $m=1.55$ 的悬链线。桥面行车道宽度为 15m，拱肋采用全桁架式断面，拱顶高 7m，拱脚截面径向高 14m。主拱肋弦管采用直径 ϕ1220mm、壁厚 22mm 的钢管，内填 C60 混凝土。桥面系为钢筋混凝土结构，吊杆间距 12m。该桥为中承式钢管混凝土桥，如图 3-1-3 所示。

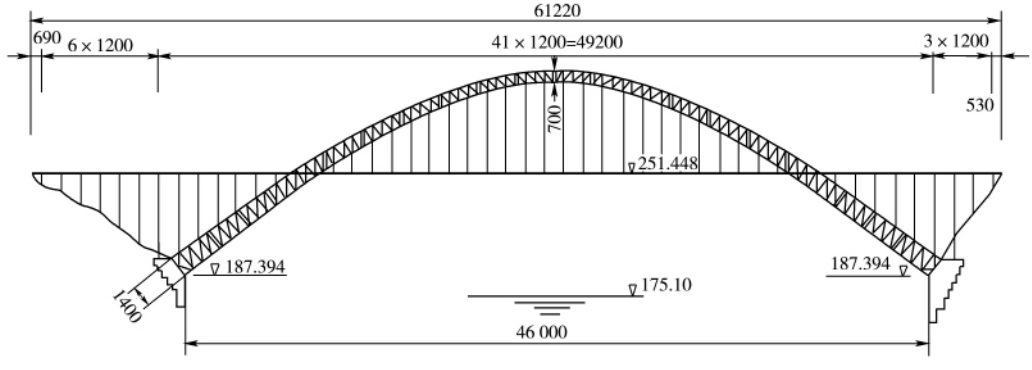


图 3-1-3　重庆巫山长江大桥（尺寸单位：cm；高程单位：m）

大跨度钢管混凝土拱桥的主要施工方法主要有无支架缆索吊装法、少支架缆索吊装法、转

体施工法等。

四、桁架拱桥、桁式组合拱桥

桁架拱由钢筋混凝土或预应力混凝土桁架拱片、横向连接系和桥面系等组成，桁架拱片是桁架拱桥的主要承重构件。20 世纪 80 年代以前，我国桁架拱桥主要以中小跨度的普通钢筋混凝土为主，后来逐渐发展到大跨径的预应力混凝土桁架拱桥。到 90 年代以后，随着施工技术和机具设备的提高和改善，桁架拱桥的跨径增长很快，如我国贵州省的江界河预应力混凝土桁架拱桥跨度就达到 330m，如图 3-1-4 所示。江界河桥位于贵州省瓮安县，跨越乌江中游峡谷。主跨为 1 孔 330m 组合预应力混凝土桁架拱，桥面高出常水位近 270m。边跨桁架顺着山坡分别为 30＋20(m)及 30＋25＋20(m)，全长 461m。它的布孔特点是利用山坡岩石，使边孔的下弦杆与岩盘合一，斜拉杆的预应力粗钢筋锚于岩盘内。桥面为净 9＋2×1.5(m)人行道，全宽 13.4m。拱圈高 2.7m(L/122)，宽 10.56m(L/31.3)。矢跨比为 1/6。采用起重量为 1200kN 的钢格构人字扒杆和 ϕ32mm、40Si_2MnV、Ⅳ级钢轧丝锚碇体系悬臂拼装和体系转换。受拉的斜腹杆采用 24ϕ5mm 高强钢丝和钢质锥销锚和镦头锚体系。

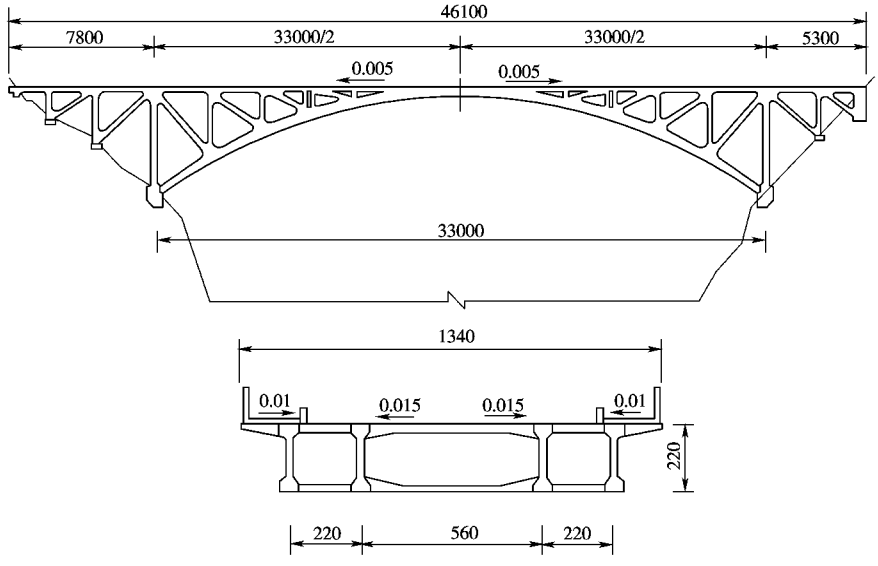


图 3-1-4　贵州江界河预应力混凝土桁架拱桥(尺寸单位：cm)

桁架拱桥、桁式组合拱桥一般采用预制拼装施工，可分为预制杆件或预制构件施工两种，此外还有缆索吊装或悬臂拼装等施工方法。

五、刚 架 拱 桥

刚架拱桥是我国 20 世纪 70 年代发展起来的一种新型拱桥，它的施工方法相似于双曲拱桥或桁架拱桥，但其构造简单，主要受力构件是主拱腿上纵梁及其间的斜支撑。该种桥型一般适用于中小跨径，但在百米以上的拱桥方案中也有被采用的例子。

如图 3-1-5 所示，德兴太白桥位于江西省德兴铜矿区，跨越乐安江，是一座跨径为 130m 的刚架拱公路桥。该桥采用转体施工，先在岸边的简易支架上组装钢管混凝土骨架和现浇 10cm 底板混凝土，通过张拉 42ϕ25mm 拉杆钢筋，使桥体与支架脱离形成转动体系。转动体系是支承在桥台基础上的钢筋混凝土磨心球铰上，转动体系重 18100kN，于 1993 年 3 月建成。

刚架拱桥的主要施工方法有有支架施工法、无支架缆索吊装法、少支架缆索吊装法、转体施工法等。

六、箱形拱桥

1. 钢筋混凝土箱形拱桥

如图 3-1-6 所示，涪陵乌江大桥位于四川省，桥址为 V 形河谷，水深流急。大桥全长 351.83m，桥高 84m，主跨为 1 跨 200m 钢筋混凝土箱形拱，矢跨比 1/4，拱上建筑为 13 孔 15.8m 钢筋混凝土简支板，双柱式柔性排架，桥台基础置于岩石上，主拱圈采用 3 室箱，全宽 9m，由厚 20cm 的 40 号钢筋混凝土顶底板及腹板组成。该桥采用转体法施工，先在两岸上、下游组成 3m 宽的边箱，待转体合龙后再吊装中箱顶、底板，最后组成 3 室箱。桥面为净 9＋2×1.5(m)人行道。于 1989 年建成。

图 3-1-5　江西德兴太白桥

图 3-1-6　四川涪陵乌江大桥转体施工

钢筋混凝土箱形拱桥的施工方法主要有缆索吊机无支架施工法、转体施工法、临时塔架斜拉悬臂施工法等。

2. 钢箱拱桥

钢箱拱桥是近年来修建较多的一种大跨度拱桥形式，如图 3-1-7 所示的上海卢浦大桥主桥是一座超大跨径拱、梁组合体系全钢结构空间提篮形中承式系杆拱桥。跨径组合 100＋550＋100(m)主拱矢跨比 1∶5.5，拱高 100m。

钢箱拱桥一般采用支架法、支架斜拉悬臂拼装法等方法。

图 3-1-7　上海卢浦大桥

第二节　大跨度拱桥的施工用缆索吊装设备

缆索吊机是大跨度拱桥的施工设备之一，以下予以简要介绍。

一、缆索吊机塔架

塔架由塔顶和索鞍、塔身、塔底等部分组成。

1. 塔身

大跨度桥梁施工用缆索吊机塔身一般有以下几种。

(1)装配式杆件拼装的塔身

用于拼装塔架的主要有万能杆件、贝雷桁节片、碗扣式脚手架杆件等，这类塔架一般单个

杆件刚度不是很大，但由于其由竖杆、水平杆、斜杆等组成缀系空腹压杆，因而塔架的总体刚度就足够大。

(2)铰接钢管塔身

一般采用吊扣合一的桅杆式铰接钢管(不灌混凝土)索塔，最大限度地减小塔端弯矩。图 3-1-8 为吊扣合一的桅杆式铰接钢管索塔，其顶部支撑缆索吊轨索等。在塔顶下部一定高度，根据要求，设置扣索支撑设施。塔底为铰接，如图 3-1-8 所示。这种结构单个杆件本身刚度较大，因此间隔一定高度布置水平系杆即可保证结构整体刚度。

图 3-1-8　桅杆式铰接钢管索塔

2. 塔顶及索鞍

塔顶(包括吊扣合一的扣索锚箱处)一般由贝雷横梁和型钢杆件等组成，如图 3-1-9 和图 3-1-10 所示。塔顶一般要放置索鞍，以承受较大的集中力。

3. 塔底

塔底一般设置为铰接，如图 3-1-11 所示。对于大跨度缆索吊机，往往用钢箱梁作为塔铰，其下面用两个板式橡胶支座作为承力和铰接结构。解决索塔的铰接问题，使索塔受力简单明确，如图 3-1-12 所示。

图 3-1-9　塔顶及索鞍布置图

图 3-1-10　扣索锚箱布置图

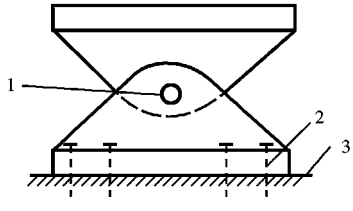


图 3-1-11　简易塔底铰接

1-钢铰；2-预埋螺栓；3-基础混凝土

图 3-1-12　塔底铰接布置

二、缆索吊机主索(承重索)

缆索吊机主索一般采用钢丝绳。主索的直径、型号和根数根据主索跨度、起吊质量、设计垂度等根据公式计算出索拉力而选定。

主索一般采用已经架好的工作索来架设,工作索一般直径较小,容易架设,在架设工作索前,与悬索桥的牵引索架设相同,先在江河或沟谷上牵引一根先导索过河,作为工作索的导引索。

主索牵引过河并架设在索塔上的索鞍后,可用卷扬机或链条滑车等工具收紧,符合计算垂度要求后用卡子卡紧。在使用过程中,对由于温度影响产生的垂度过大应进行调整。

为使各根主索在吊装过程中尽可能受力均匀,应在地锚前设置特制大滑车,各根主索通过大滑车进行连接,使其受力可自行调节。

缆索的计算内力可用检查钢丝绳的安装垂度来控制,也可根据钢丝绳的计算长度,考虑受荷后(包括温度影响)的伸长率、测量长度等来控制。

三、起　重　索

起重索套绕于主索跑车下联的起重滑车组,作起吊重物之用。起重索一般走线数较多,宜选用柔软耐磨、不易打结的钢丝绳。起重索有两种套绕方式。

第一种套绕方式为一端固定在滑车组上(死头),另一端与卷扬机相连(活头),如图 3-1-13a)所示。此法的优点是钢丝绳的磨损较小;缺点是操作麻烦,而且对于大跨度桥梁架设时,可能出现卷扬机储绳不够的现象。

第二种套绕方式为起重索的一端(死头)固定在塔架或塔架后的锚碇上,另一端穿入卷扬机(活头),如图 3-1-13b)所示。此法的优点是操作简便、构件在起吊后的运行过程中吊高保持不变,起重卷扬机持续工作时间短,比较省电;缺点是钢丝绳易于磨损。

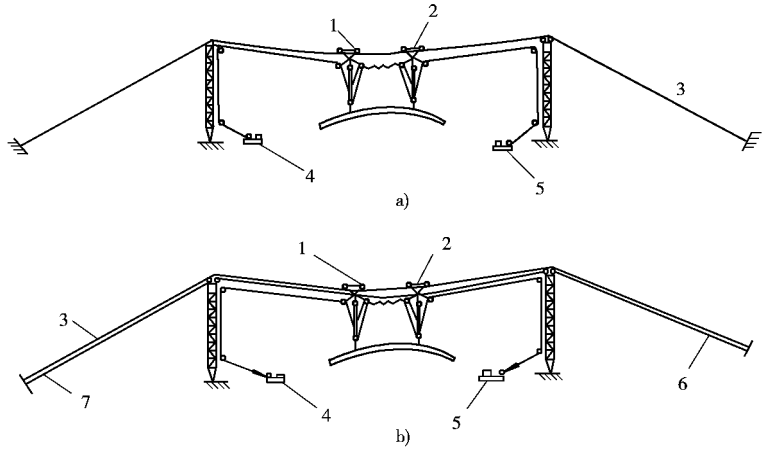


图 3-1-13　起重索套绕方式

a)起重索"死头"扎在滑轮组动滑轮上;b)起重索"活头"通过塔顶扎在地锚上

1-跑车 1;2-跑车 2;3-主索;4、5-起重索的"活头";6、7-起重索的"死头"

四、牵　引　索

牵引索的功能是使跑车沿主索前后移动到需要的位置,宜选用柔性较好的钢丝绳。

套绕方式也有两种。

第一种套绕方式如图 3-1-14a)所示。每岸设一台牵引卷扬机，一台前进用，一台后退用。牵引索一端固定在跑车上，另一端与卷扬机相连。操作时应先适当放松后退端钢丝绳，然后才能牵引起吊构件前进。

第二种套绕方式如图 3-1-14b)所示。此法只需用一台卷扬机。牵引索通过对岸转向滑车与卷扬机构成封闭回路。

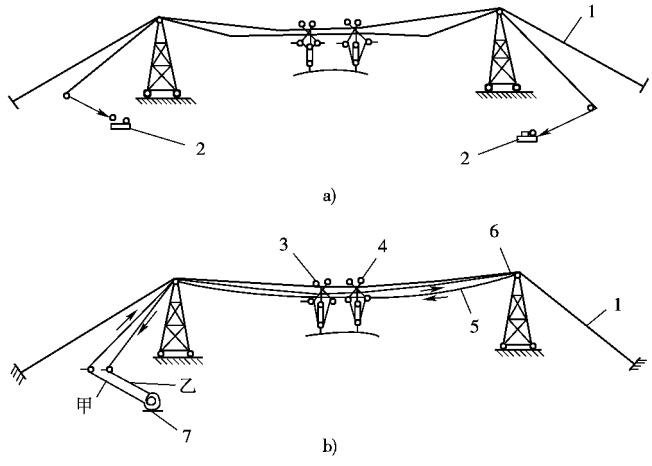


图 3-1-14　牵引索套绕方式

a)两牵引索分别在两岸进卷扬机；b)两牵引索在同一岸进卷扬机

1-主索；2-牵引卷扬机；3、4-跑车；5-牵引索；6-牵引索转向轮；7-双筒卷扬机

五、扣　　索

在拱式结构分段安装过程中，为暂时固定分段拱肋所用的钢丝绳称为扣索。扣索一般与滑车组联结，用卷扬机收放。

扣索可分墩扣(通过墩台扣固)、塔扣(通过塔架扣固在地锚上)、天扣(扣固在通缆天线上)等几种形式，如图 3-1-15 所示。

作扣索的钢丝绳一般采用与主索或起重索相同的类型，其直径大小按计算所受拉力大小确定。

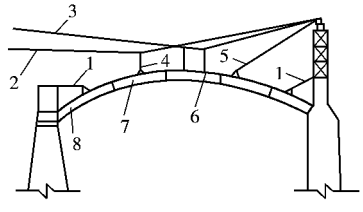


图 3-1-15　扣索形式

1- 墩扣；2-扣索天线；3-主索天线；4-天扣；5-塔扣；6-顶段；7-中间段；8-端段

六、工　作　索

一般在主索之间设 1～2 根类型与起重索相同的钢丝绳作为工作索。它不与主索发生联系，主要用于处理吊装设施故障时载人、吊运工具、电焊接头设备等。

七、风　　缆

风缆是用来稳定塔架(包括扣索排架和墩上排架)、调整和固定拱肋的装置。风缆采用的钢丝绳类型与起重索相同，其直径大小按计算所受拉力大小确定。

塔架用的风缆分天风缆(亦称通风缆)、背风缆和两侧横风缆。天风缆一端固定在地锚上，经过塔架(并在塔顶固定)引到对岸塔架上(也固定在塔顶)，然后扣紧在对岸地锚上。天风缆

也可作安全索用。背风缆固定在塔顶和主地锚上。两侧横风缆固定在塔顶侧面和上下游地锚上。

拱肋风缆(亦称八字风缆),是用于保证拱肋暂时稳定和安装过程中调整拱肋轴线的一种设施。系在安装段靠近拱肋接头处,上下游两边各设一组风缆,用手摇绞车或链条滑车收紧。

八、横　移　索

在受到施工现场条件或吊装设施限制情况下,安装构件不能做到正起吊、正落位时则需通过横移索来实现横移就位。横移索的方向应尽可能与起吊构件的轴线相垂直。横移索的直径大小亦应按计算拉力大小确定。

九、跑车(天车、骑马滑车)

跑车是在主索上运行和起吊重物的装置,可用定型滑车制作,也可根据吊重的情况自行加工。跑车由跑车轮、起重滑轮组和牵引系统三部分组成。跑车横向轮数决定于主索根数,纵向排数通常为 1～4 排,排数愈多,轮压愈小,磨损也愈小,跑车轮的直径愈大,主索和跑车轮间的磨损也愈小,但自重加大。目前常用的跑车轮多为铸钢件。

起重滑轮组分为上、下两组:上滑轮组为定滑轮组,与跑车联系在一起;下滑轮组又称为动滑轮组,与构件吊点千斤绳连在一起。

牵引系统是在跑车轮与定滑轮组的连接框架上或者连接轴上设置一个铁环固定牵引索以牵动跑车。若一组主索上设有两个跑车,其间可用一根短钢丝绳相连。

跑车的形式很多,较常用的三种形式如图 3-1-16 所示。

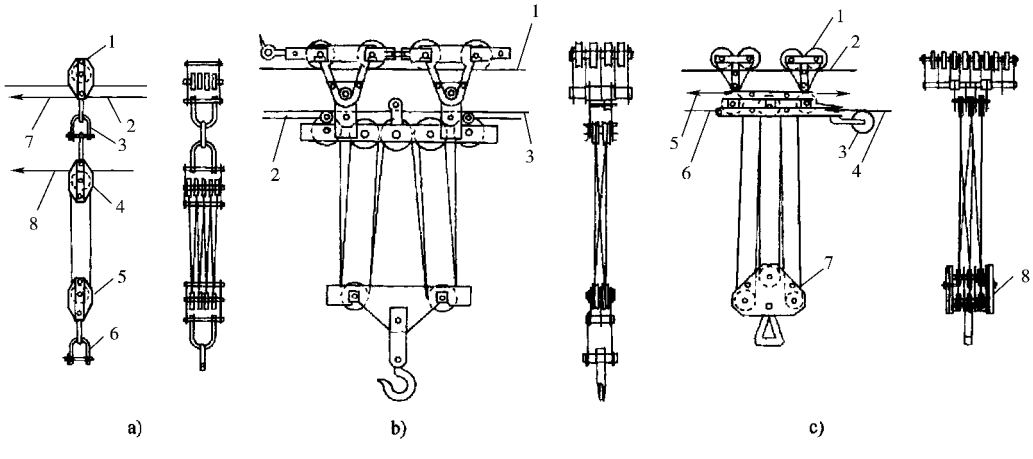


图 3-1-16　跑车形式

a)1-四门滑轮;2-联系千斤;3-扣环;4-5 门滑轮;5-4 门滑轮;6-扣环;7-牵引索;8-起重索

b)1-主索;2、3-起重索

c)1-跑车轮;2-主索;3-牵引索托轮;4-牵引索;5-起重索;6-联系千斤;7-吊点;8-配重板

十、索　　鞍

一般中小型缆索吊机的索鞍由工地自行设计计算,自行加工制作。大跨度和大吊装吨位的缆索吊机索鞍宜专门加工。

索塔顶部应设置索鞍以支承主索,为使主索通过索鞍时受力良好,要求索鞍半径大于钢索

直径 d 的 12 倍或钢丝直径 Φ 的 300 倍。

图 3-1-17 所示索鞍形式较好，主索在索鞍上可以无限制地移动。当采用单轮式索鞍时，可使索鞍压力固定在索塔中线上，但滑轮直径应稍大一些。缆索吊装架桥设备用的是单滑轮式。

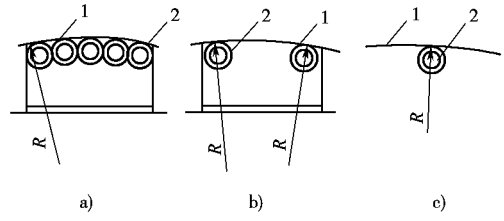


图 3-1-17 索鞍形式

a）多转轮式；b）双转轮式；c）单滑轮式

1-钢索；2-转轮或滑轮

第二章 钢管混凝土拱桥

DIERZHANG

第一节 概 述

钢管混凝土结构中由于管内混凝土的径向受力变形受到钢管的约束，从而使其处于三向受力状态而大幅度提高承载能力；同时，钢管的套箍作用也提高了混凝土的塑性性能，使得混凝土，特别是高强混凝土的脆性弱点在一定程度上得到克服；对于钢管而言，由于内填混凝土的支撑作用，大大增强了管壁的稳定性，钢管的整体刚度和稳定性也有很大的提高。由于两种结构材料在性能上的互补，使得钢管混凝土材料应用于以受压为主的拱桥结构中，较之钢结构和混凝土结构要优越得多。

在结构材料用量方面，钢管混凝土比钢结构节省约一半钢材，虽比钢筋混凝土结构用钢较多，但施工用钢却相应减少，特别是对大跨钢管混凝土拱桥可采用无支架施工更是如此。

第二节 钢管混凝土拱桥的结构形式和基本性能及特点

一、结构基本形式

钢管混凝土拱桥以支承形式而言，可分为上承式、中承式和下承式。

国内上承式的钢管混凝土拱桥主要有三峡工程专用公路跨径均为 160m 的黄柏河大桥和下牢溪大桥（如图 3-2-1 和图 3-2-2 所示），以及重庆奉节跨径 288m 的梅溪河桥（如图 3-2-3 所示）。上承式拱桥属有推力拱，适合于地质条件较好的桥位。其优点在于构造简单，结构受力

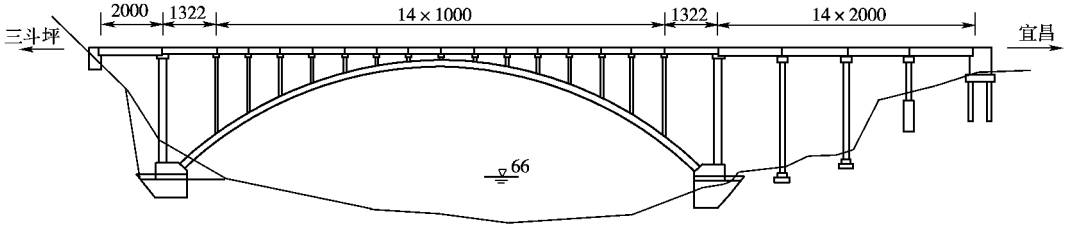


图 3-2-1 黄柏河大桥立面图（尺寸单位：cm；高程单位：m）

明确，整体性、横向稳定性及抗震性能均较好。

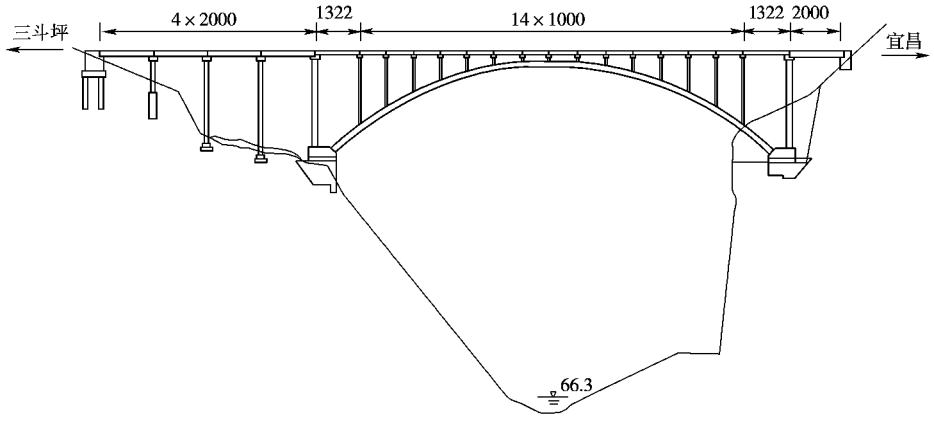


图 3-2-2　下牢溪大桥立面图（尺寸单位：cm；高程单位：m）

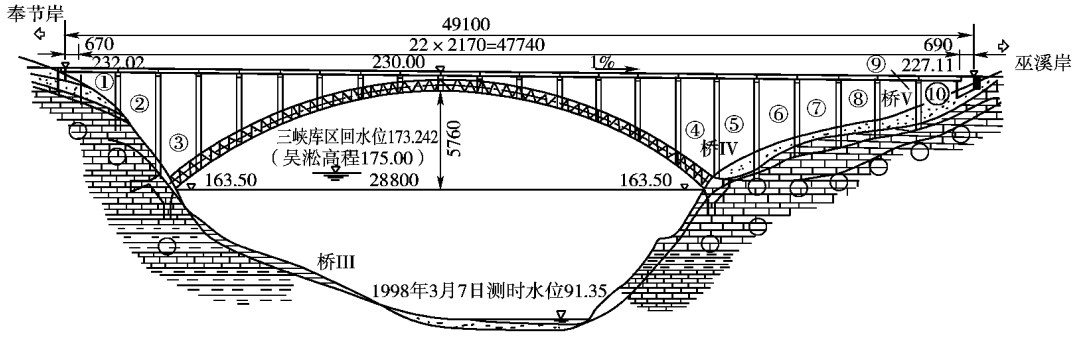


图 3-2-3　重庆奉节梅溪河桥总体布置（尺寸单位：cm；高程单位：m）

下承式拱桥主要用在建筑高度受限制和地基条件较差的情况下，其一般带有系杆，按照是否有支座可分为有支座的拱梁组合结构和无支座的刚架系杆结构。

拱梁组合结构的系杆与桥面纵梁合二为一，属拉弯构件，拱和梁刚接，拱脚支承于支座上。其上部结构完全是外部静定、内部超静定结构。由于这种结构超过一定跨度后，架设较为困难，故本文不予详述。

刚架系杆结构不设支座，拱肋直接与桥墩固接。单设系杆，并用预应力平衡拱的推力，桥面系独立另设。由于系杆预应力的作用，基本上消除了拱的水平推力，对下部结构的要求不是很严格，比较适宜于较大跨度。跨径 280m 的湖北武汉汉江上的晴川桥就是这种桥式。

中承式钢管混凝土拱桥近年来在国内修建的较多，跨度也越来越大，连徐高速公路上跨径 235m 的京航运河大桥和主跨 360m 的丫髻沙大桥（图 3-2-4）均为转体施工。

大跨度中承式拱桥的结构主要是刚架系杆拱，为了施工方便和结构受力合理，一般为带悬臂的三跨自锚式的结构，增加悬臂部分主要是为了平衡主跨的受力，有利于转体施工。如图 3-2-5所示为广西三岸邕江大桥。

二、拱肋横向结构

对于上承式拱，多采用多肋式结构，横向联系一般布置为等间距的径向横撑或横系梁，其横向稳定性主要取决于拱桥的宽跨比。对于中承式拱和下承式拱，由于受到行车净空的限制，

以及美观的考虑，应该统筹考虑其布置形式。为了增强拱的横向稳定性，必要时可将两肋内倾而形成提篮式拱，在满足横向稳定性的情况下，一般拱肋为平行拱肋。

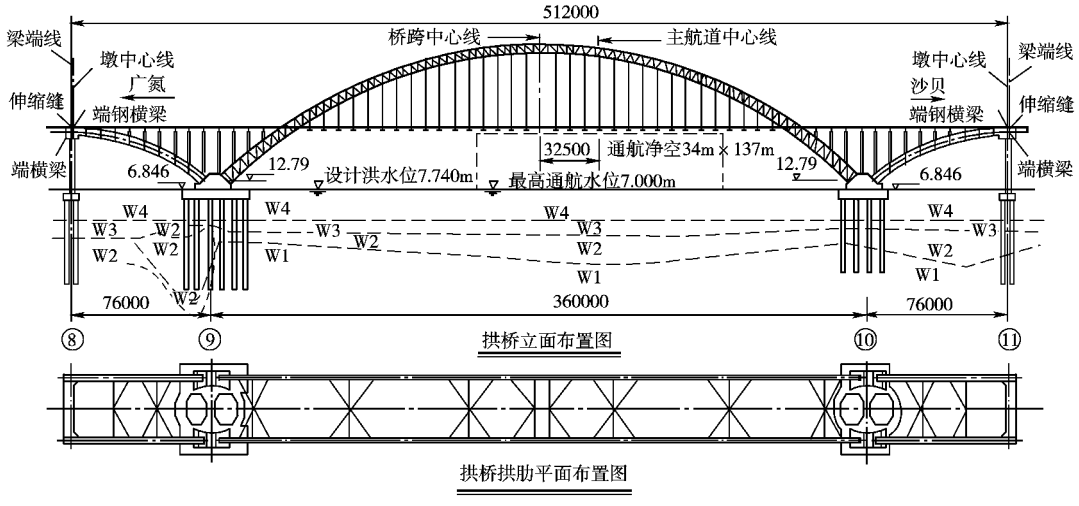


图 3-2-4　丫髻沙大桥主桥拱桥平、立面布置图(尺寸单位：mm；高程单位：m)

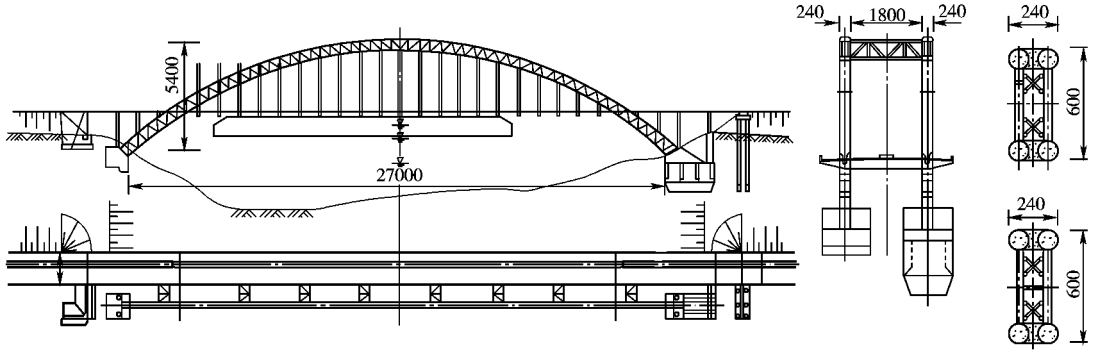


图 3-2-5　广西三岸邕江大桥总体布置图(尺寸单位：cm)

1. 横撑布置

由于拱肋横向失稳向面外侧倾时，拱顶处的横撑主要承受拱肋的扭转变形，所以拱顶附近的横撑一般布置成正交，以增强拱肋在拱顶处的扭转约束；在其他地方，尤其是 $L/4$ 附近拱肋侧倾时横撑要承受拱肋的相对错动，横撑承受横向弯矩，因此，在这些地方横撑采用切向布置(如 K 形撑)，如图 3-2-6 所示，以约束拱肋的相对错动。

图 3-2-6　钢管混凝土拱肋 K 形撑

2. 提篮拱

提篮拱能显著地提高拱的横向稳定性，但同时会降低拱肋的极限承载力。随着拱肋倾角的增加，下部结构的工程数量会相应增加，所以，一般将拱肋的倾角控制在 3°～5°范围内。徐州至连云港高速公路徐州京杭大运河特大桥就采用提篮

拱，如图 3-2-7 所示。

三、拱肋截面构造

如前所述，钢管对混凝土有套箍作用，混凝土使钢管免于屈曲失稳，所以，钢管壁厚过厚则不经济；而过薄则钢管对混凝土的套箍作用不够。一般来说，若以钢管的直径 D 与壁厚 t 之比为参数，则 D/t 应小于 100。

此外，钢管混凝土拱肋又有内填式和内填外包式两种形式，如图 3-2-8 所示。

图 3-2-7　徐州京杭大运河钢管混凝土提篮拱桥

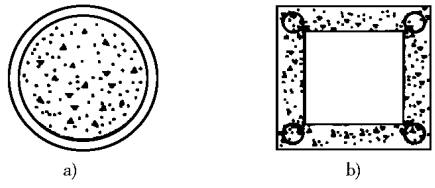


图 3-2-8　钢管混凝土拱肋内填式和内填外包式
a）内填式；b）内填外包式

钢管内混凝土的强度等级一般在 C40～C60。

钢管混凝土拱桥的拱肋，可分为实体拱肋和桁式拱肋。实体拱肋又分为单管、哑铃形以及集束式截面。

单管拱肋一般只用于较小的跨度。哑铃截面应用于几十米到 160m 的跨径，一般以 100m 左右的跨径为多，如图 3-2-9 所示。集束钢管混凝土截面采用多根钢管，称之为集束管，如图 3-2-10 所示。集束管之间不通过焊接或栓接连接，而是通过隔一段用钢箍箍住来保证共同受力。这种材料结构加工量少，材料用量比桁架多，其受力性能有待实践与理论研究验证。

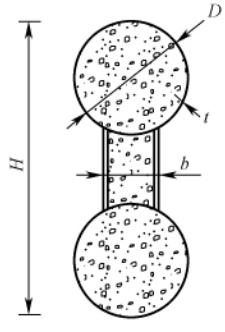


图 3-2-9　哑铃形截面钢管混凝土拱肋截面

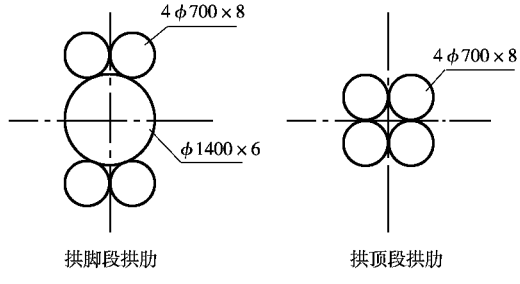


图 3-2-10　峡门口乌江大桥集束式钢管混凝土拱肋断面（尺寸单位：mm）

桁式拱肋能够采用较小的钢管直径取得较大的纵横向抗弯刚度，且杆件以受轴向力为主，能够充分发挥材料的特性，对跨径超过 100m 的钢管混凝土拱桥，它是一个比较合适的截面形式，并简称桁拱。其拱肋截面如图 3-2-11 所示。

多肢桁式（格构式）断面的钢管混凝土肋拱，其弦杆采用钢管混凝土，而腹杆和平联采用空

钢管。如浙江省杭州市的钱塘江四桥(复兴桥)就是采用这种截面形式,如图 3-2-12 所示。

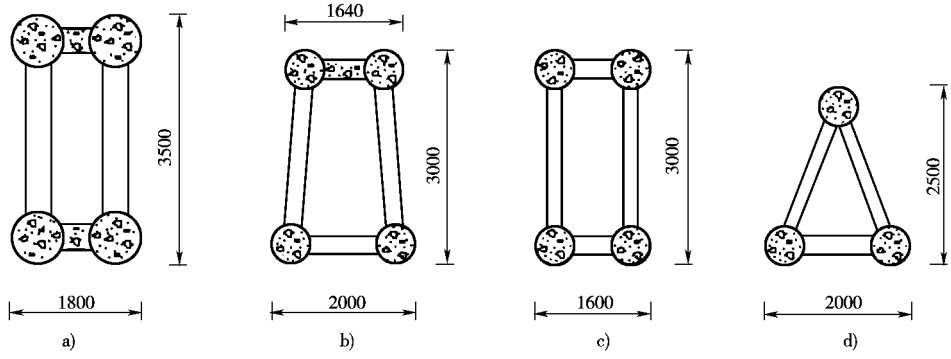


图 3-2-11　钢管混凝土桁拱拱肋截面(尺寸单位:cm)

a)南海三山西大桥横哑铃形桁式;b)安阳文峰路立交桥混合式;c)福建闽清石潭溪大桥四肢式;d)依兰牡丹江大桥二肢桁式

四、桥　面　系

除少数拱梁组合桥的桥面系以纵梁为主,在大多数的钢管混凝土拱桥中,桥面系均以横梁为主结构,即将横梁设置于立柱上或吊杆下,然后纵向铺设桥面板(梁)。活载经桥面系通过横梁传给立柱或吊杆,立柱或吊杆再将荷载传给拱肋。如图 3-2-13 所示。

图 3-2-12　钱塘江四桥(复兴桥)多肢桁式(格构式)断面的钢管混凝土肋拱

对于跨度超过 150m 的中、下承钢管混凝土拱桥中,吊杆间距一般在 8～12m 之间,为了缩短横梁的跨度,降低跨中弯矩,横梁一般做成伸臂式,将非机动车道以及人行道悬挑。

为了减轻横梁的自重,可采用钢-混凝土组合梁,即在钢梁上面再浇筑混凝土形成组合构件。

应当指出:以横梁为主的桥面系,其整体性较差,刚度也较小,对于大跨度桥尤其如此,所以应当在桥面系中加设加劲纵梁。

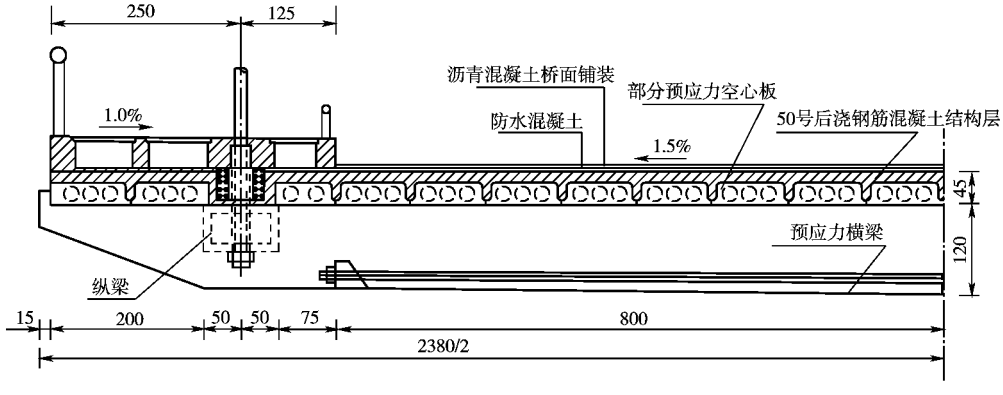


图 3-2-13　深圳北站大桥横梁构造图(尺寸单位:cm)

对于上承式拱，加劲纵梁通过立柱与拱肋形成联合作用，不仅加强了桥面系的整体性和刚度，而且减小了拱肋的受力。

对于中、下承式拱桥，加劲纵梁将显著提高桥面系的整体性和整体刚度，尤其是横向刚度。当横梁为混凝土结构时，纵向加劲梁一般也为混凝土结构，也有的采用钢管桁架作为加劲纵梁。当横梁为钢-混凝土结合梁时，加劲纵梁一般采用钢梁。

吊杆和立柱的设置应能有效地适应拱肋和桥面之间的不同变形，特别是短吊杆和短立柱，由于其刚度较大，且处于受力和变形的过渡处，一般采用加大其自由变形长度、或在锚固处设置铰接等措施来防止其发生破坏。

吊杆和系杆一般采用高强度钢丝或钢绞线，过去一般采用水泥浆防护，但根据多座桥的实践，证明这不是一种有效的防腐办法；现在一般采用 PE 防护，并在锚头附近灌注防腐油的办法，如图 3-2-14 所示。

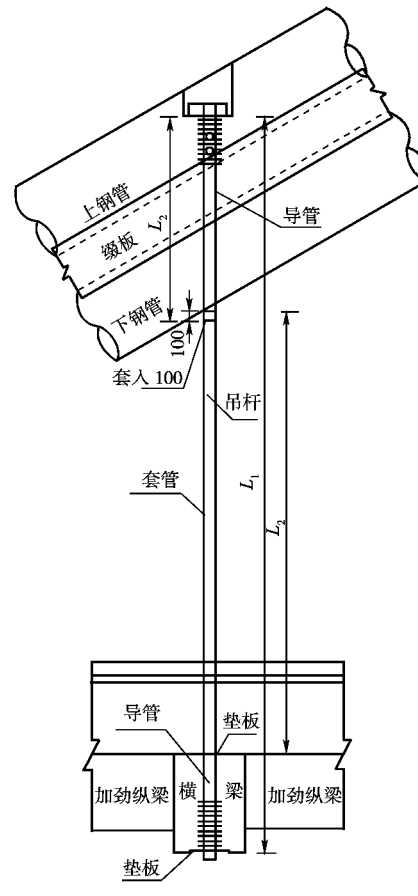


图 3-2-14　吊杆钢管防护套防腐构造(尺寸单位：cm)

第三节　钢管拱肋的制作

大跨度钢管混凝土拱桥钢管拱肋的制作一般由专业钢结构厂家制作，施工单位给予配合。

大跨度钢管混凝土拱桥的钢管拱肋一般采用有缝钢管，其造价较低，施工质量一般也容易保证。

有缝钢管的焊缝分为直焊缝和螺旋焊缝两种。螺旋焊缝钢管适宜于加工，有利于钢管与混凝土的共同作用，但其焊缝长度比直焊缝长，在由多管组成拱肋时，容易与其他的焊缝相交叉。直缝焊管加工设备要求较低，管节较短运输方便，焊缝相对较少，且易与其他焊缝错开。究竟采用何种焊缝，应视拱肋的结构构造、工厂的加工机具设备和综合条件决定。

当采用直缝焊接管时，由于管节较短，拱肋骨架的弧线可以采用分段直线以折线逼近曲线；当采用螺旋焊接管时，由于管节较长，则应将其弯制成弧形。同样，直焊缝焊接管当管节较长时，也应将其弯制成弧形。具体加工工艺应按《铁路钢桥制造规范》(TB 10212—98)规定执行。

钢管混凝土拱桥拱肋的连接方式以焊接为主，焊工必须经考核取得施焊资格证书方可上岗。焊接质量必须通过超声波或 X 射线检测，对不合格的焊缝，必须铲掉重焊，并重新通过探

伤检验。对腹板角焊缝或对接焊缝，可采用磁粉探伤检验。

钢管拱肋的防腐涂装目前多采用富锌漆防护、玻璃纤维复合防腐防护、金属热喷涂防护等。目前后者应用最广，如钢管拱肋采用电弧喷铝长效防腐技术，其防护寿命可达三十年以上，是通常防锈漆防腐寿命的十倍左右。

钢管喷涂防护层之前，必须按要求认真处理钢管表面，才能达到设计的防护效果。在喷涂防护层之前，应进行涂装工艺试验，对于重要的桥梁以及处于易腐蚀环境的桥梁，应进行涂层工艺试验。涂层试验包括切割试验、中性盐试验、涂层密度试验和涂层附着力试验等。经检验符合要求后才能进行大面积喷涂作业。

第四节　钢管混凝土拱桥的架设

一、钢管混凝土拱桥的架设方法

常用的钢管混凝土拱桥的施工方法可分为支架施工法、缆索吊装法、转体施工法。

1. 支架施工法

钢管混凝土拱桥的结构设计往往由施工内力所控制，因此它的发展可以说是随着施工方法的不断改进而发展的。早期的钢管混凝土拱桥主要采用支架施工法，在桥跨位置架设支架，在支架上完成主拱肋的拼装或主拱圈的浇筑，整个施工过程桥跨结构处于无应力状态。它的施工机械比较简单，施工技术不太复杂。但随着桥跨的不断增大，尤其对于那些跨越大江大河和深谷沟壑的桥梁，若仍然采用有支架的施工方法，施工设备和临时设施的费用将急剧上升，无论从施工的角度还是从经济的角度考虑，这种方法都不适合大跨度拱桥的施工。因此钢管混凝土拱桥跨径要实现大的突破，施工方法必须要有大的改进，使主拱圈成为自架设体系。对于小跨径的钢管混凝土系杆拱桥，支架法还是可以考虑采用的一种施工方法，它操作简单，安全可靠，适合于规模较小的施工队伍。支架施工方法可分为以下三种：先梁后拱法、先拱后梁法、满堂支架法。

2. 缆索吊装法

这种施工方法符合自架设施工的三个关键要点：先期施工的结构部分要轻、强度要高，且能为后续施工的结构部分提供强有力的支撑；架设过程的受力情况与成桥后的受力情况要基本一致，减少临时辅助设施；自架设体系桥梁先后架设部分先后受力，因而结构要有受力自调整能力或能够借助外来力量调整内力。缆索吊装施工法是大跨度拱桥实现自架设施工的主要方法之一。在峡谷或水深流急的河段上，或在通航的河流上需要满足船只的顺利通行，缆索吊装由于具有跨越能力大、水平和垂直运输机动灵活、适应性广、施工比较稳妥方便等优点，而在拱桥施工中被广泛采用。缆索吊装施工是在 20 世纪 60 年代应用于双曲拱桥施工的基础上发展起来的。在广泛的工程实践过程中，这种方法得到了很大的发展并积累了丰富的施工经验。缆索吊装法在应用于钢管混凝土拱桥的施工后，极大促进了该类桥型的发展，同时，也使自身有了更多的创新，形成了适合钢管混凝土拱桥施工特点的施工技术。由于大跨径钢管混凝土系杆拱桥中，钢管拱肋节段多、质量大，因此在传统的缆索吊装施工方法上进行了改进和创新，采用了一些新的技术和施工工艺。缆索吊装法应用于钢管混凝土拱桥主拱肋施工，主要有两种施工方式：一种是类似于斜拉桥施工技术的千斤顶斜拉扣挂技术；一种是利用悬索桥主索原理的主缆悬挂技术。两种施工技术力学原理不一样，但主要的施工机具设备相差不大。

3. 转体施工法

钢管混凝土系杆拱桥转体施工法是将拱桥主拱圈大致分为两个对称的半跨，分别在桥梁施工现场两侧利用实际地形先做好简单支架或拱胎模架，在支架或模架上按照设计拱轴线形完成组拼拱肋桁架节段和横向连接构件的工作，并用扣索将组拼成形的半跨拱肋与转体系统动力设备连成一体，然后操作动力系统施力使拱肋旋转一定空间角度实现主拱肋的合龙。转体施工根据主拱圈绕拱座的转动方向可分为以下三种：竖向转体施工法，平面转体施工法，竖转、平转组合法。

转体施工方案具有以下特点：

转体能较好地解决拱桥的安装线形，控制内距，同时也能改善操作人员超高空作业的工作环境，提高工作效率，焊接质量也容易得到保证。

钢管桁架在施工过程中体系内力容易控制，施工设备自动化程度高，操作方便灵活，安全性好，可靠性高。

施工工序简洁，施工操作规范化程度高。

施工过程中一般不会影响航运。

施工设备、物资及人员投入少，经济可行。

对于大跨度钢管混凝土拱桥，其架设的方法主要有无支架缆索吊装法和转体施工法。这里主要介绍这两类桥的施工。

二、钢管混凝土拱桥的无支架吊装法

以下以重庆巫山长江大桥主桥钢管混凝土拱桥为例。

该桥桥址位于长江巫峡入口处，设计为中承式钢管混凝土双肋拱桥，主跨净跨为460m，位居同类型桥梁世界第一，全桥跨径组合为6×12m(引桥)+492m(主跨)+3×12m(引桥)，全桥布置如图3-2-15所示。

主拱座施工程序如下：

两岸主拱座均处于裸露的灰岩上，并位于卸载带上，采用按地质构造的卸荷线开挖拱座以上土石方卸载，然后按图纸要求人工开挖基坑再施工拱座。

主拱肋施工程序如下：

1. 钢管拱肋的加工及安装

钢管拱肋节段及横联在工厂加工运达现场后采用无支架缆索系统进行吊装就位，钢绞线扣索进行斜拉扣定。

2. 拱肋弦管内混凝土的压注

采用自两端拱脚向拱顶连续压注。

3. 上部构造施工

(1)拱上立柱施工

拱上立柱采用工厂加工运达现场后吊装就位焊接再压注管内混凝土，盖梁采用预制安装。

(2)吊杆、横梁、车道板及桥面施工

吊杆、横梁、车道板采用预制安装，桥面采用现浇。

4. 主要施工难点

(1)钢管拱肋节段采用无支架缆索吊装系统吊装成拱，包括难点：

①缆索吊装系统的索跨大：达576m。

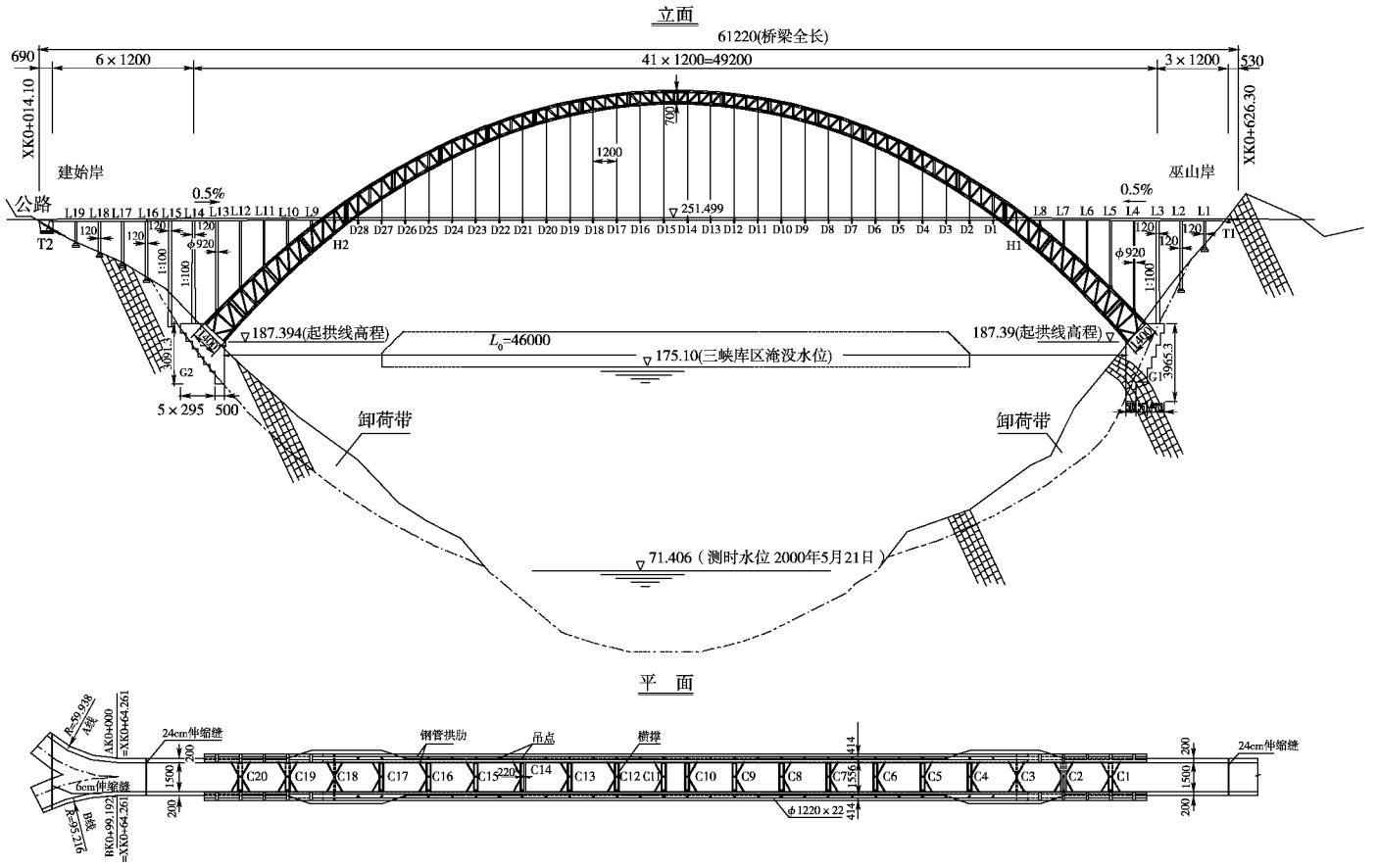


图 3-2-15　**重庆巫山长江大桥全桥布置图(尺寸单位**:cm;**高程单位**:m)

②吊重大：节段重 128t，设计吊重 170t。

③索塔高度大：达 150.22m。

④构件起吊高度大：达 260m。

⑤不能断航：黄金水道不能长时断航。

(2)各根钢管拱肋弦管内混凝土的连续压注。

5. 主要施工技术

(1)缆索吊装系统布设技术

缆索吊装系统包括吊塔(置于扣塔上)、锚碇、承重缆索、压塔索、起吊滑车组、分配梁、卷扬机、承索器等。

①用辅助支架安装扣塔

扣塔为管结构，由厂家对其分节、分片加工后，船运至桥孔下的水域，起吊高度达 180～290m 后才能到安装的位置，扣塔构件安装后，在焊接工作完成前，扣塔上不能承受外力作用，因此，扣塔的安装不能由塔吊来辅助。

经过分析比较，选用万能杆件拼成的支架来辅助安装扣塔，由系于其上的通长缆风索来确保稳定，如图 3-2-16 所示。

②缆索索塔直接铰支于扣塔顶面上

缆索系统如另设独立的吊装用索塔(吊塔)需用万能杆件约 2100t，而将吊塔直接铰支于扣塔顶面以上，仅需杆件 320t。扣塔为钢管支架格构柱，竖向 ϕ610×10 的钢管内灌筑 C60 混凝土。经复核计算，扣塔能承受支于其上的 750t 的吊塔压力。因此，将吊塔置于其上(塔顶设避雷针)，如图 3-2-17 所示。

图 3-2-16　辅助支架布置

图 3-2-17　缆索索塔直接铰支于扣塔顶

③索塔顶仅设纵向压塔索

索塔为双柱门式索塔，中心距 20m。索塔高南岸为 150.22m，北岸为 125.72m。因地形限制，无法在塔顶上设置沿桥长及横桥向的"八字"抗风索。经受力分析后，确定仅加设 4 根 ϕ47.5 的纵向压塔索，张紧力为 320kN，在塔顶处塔、索固定，而横桥向不设。但在建始岸，因索塔高度大，加设了横向抗风索，初张力 100kN。

对塔顶作上述约束后，在缆索布置完成后进行试吊时，索塔偏位纵向最大值为 24cm，试吊后

进行了调整，正式吊装时，索塔最大纵向偏位 20cm，横桥向最大偏位 4cm，均在允许的范围内。

④塔顶结构索鞍横梁下设置弹性支座

主吊索鞍处承受集中力大于 1600kN，作用于横梁中心，如横梁下与塔顶杆件的支承靴间用刚性支撑，将使中间一排柱承受绝大部份的压力，造成受力不均，因此，在中间一个支承靴上加设厚度为 20mm 的橡胶（弹性）支座，使受力传开，其值在 500～1000kN 之间。

⑤吊锚锚碇用桩锚并加设岩锚

本桥吊锚受力 18000kN，上、下游锚碇受力各为 9000kN。锚碇处地面倾角＞45°，岩石破碎，设重力式锚碇土抗力不足，决定采用桩式锚碇，同时在锚碇后方加设平均长度为 20m 的 $9\Phi^{j}15.24$ 的无粘结预应力束岩锚，作为安全储备。岩锚前端锚固于承台上，选用 $R_y^b=1860MPa$ 的钢绞线，张拉控制应力 $0.6R_y^b$。如图 3-2-18 所示。

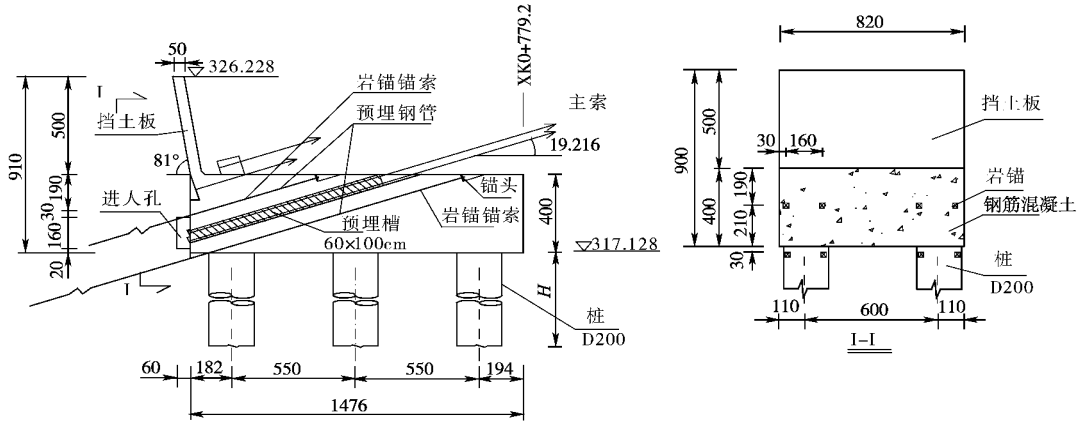


图 3-2-18　吊锚布置示意图（尺寸单位：cm；高程单位：m）

⑥特制 Φ56（CFRC8×36SW＋IWR-56mm）满充式钢丝绳作承重主索

该索单根索破断拉力≥2450kN，由于是首次生产，经咨询和研究，并反复试验，确定承重主索的受力安全系数≮3，钢绳的连接采用特殊的索夹，间距为 40cm。

⑦设置主动式承索器

其目的是减小起重索或牵引索在其转线点间的距离，从而减小吊点（吊具）的配重。承索器挂于主索上，托起组主索下的 2 根起重索和 2 根牵引绳，承索器间相互用 Φ19.5 钢索相连，进入一台 50 kN 的卷扬机形成循环线，开动卷扬机，主动控制承索器的最佳位置，如图 3-2-19

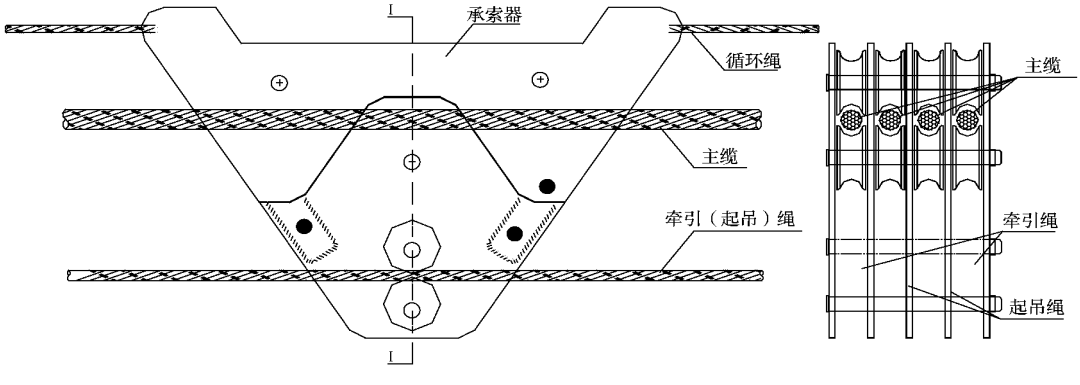


图 3-2-19　承索器结构示意图

所示。

本桥设置主动式承索器后每个吊点配重仅为 5t；同样垂度下，如不设承索器，每个吊点配重将达 25t。在运行中，承索器轮对起吊及牵引索进行梳理，经受多次七级以上大风也未出现起重索或牵引索相互打绞的现象。

⑧采用特制起吊滑轮组

滑轮组采用上 5 轮下 4 轮，组成 8 线起吊滑车组，单轮受力按 200kN 设计，外直径为 480mm，用滚柱轴承。

⑨选用恒力起吊、牵引卷扬机

卷扬机选用摩擦式恒力卷扬机，附带卷绳器。根据该桥的特点，定制的起吊用卷绳盘卷绳量为 2200m（Φ24 mm 钢丝绳），牵引用卷绳盘卷绳量为 1200m（Φ28 钢丝绳），卷绳筒配备 40N·m 的力矩卷扬机做动力，如图 3-2-20 所示。

图 3-2-20　起吊牵引卷扬机

(2)斜拉扣挂系统布置技术

斜拉扣挂系统包括扣塔、索鞍、扣锚、扣索、扣索固定端及扣索张拉系统等，主要采用了：

①扣塔上采用多个滚轮做成弧形索鞍

其目的是增大钢绞线的弯曲半径，使钢绞线受力后不致产生大的弯应力。弧形索鞍轮的半径为 2962mm，每束 6～10 根的钢绞线均通过宽度为 54mm 的轮槽，如图 3-2-21 所示。

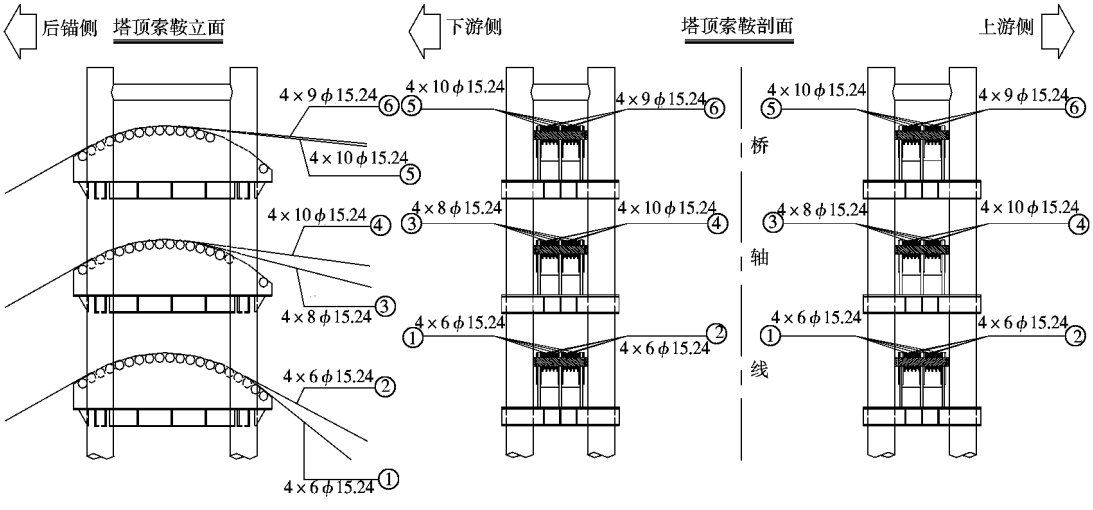


图 3-2-21　扣塔上弧形索鞍位置示意图

②扣锚采用桩锚加岩锚作为安全储备

该方案解决了桩锚前端土体抗力不足的问题。考虑到桩上的承台的前墙上承受扣索的张力共 2×12500kN。前墙既受弯，也有上拔力，因此，前墙设水平预应力束 8 束，竖向设预应束 4 束，每一侧布置 12 束 9Φ^j15.24 的岩锚，方向与扣索尾索方向平行，如图 3-2-22 所示。其在使用过程中发生的位移小于 1mm。

③设置扣塔平衡索

为保证扣塔顺桥向位移不超过规定的 7.5cm，因此，设置扣塔前、后平衡索。在拱肋节段

安装前，设置前平衡索，为 4×3Φ^j15.24，拉力共计 1000kN，上端锚于扣塔顶，下端锚固于拱座上；后平衡索仍为 4×3Φ^j15.24，拉力共计 800kN，在第四号正式扣段扣索张拉前张拉到位，上端锚于扣塔顶，下端锚于扣锚顶面。

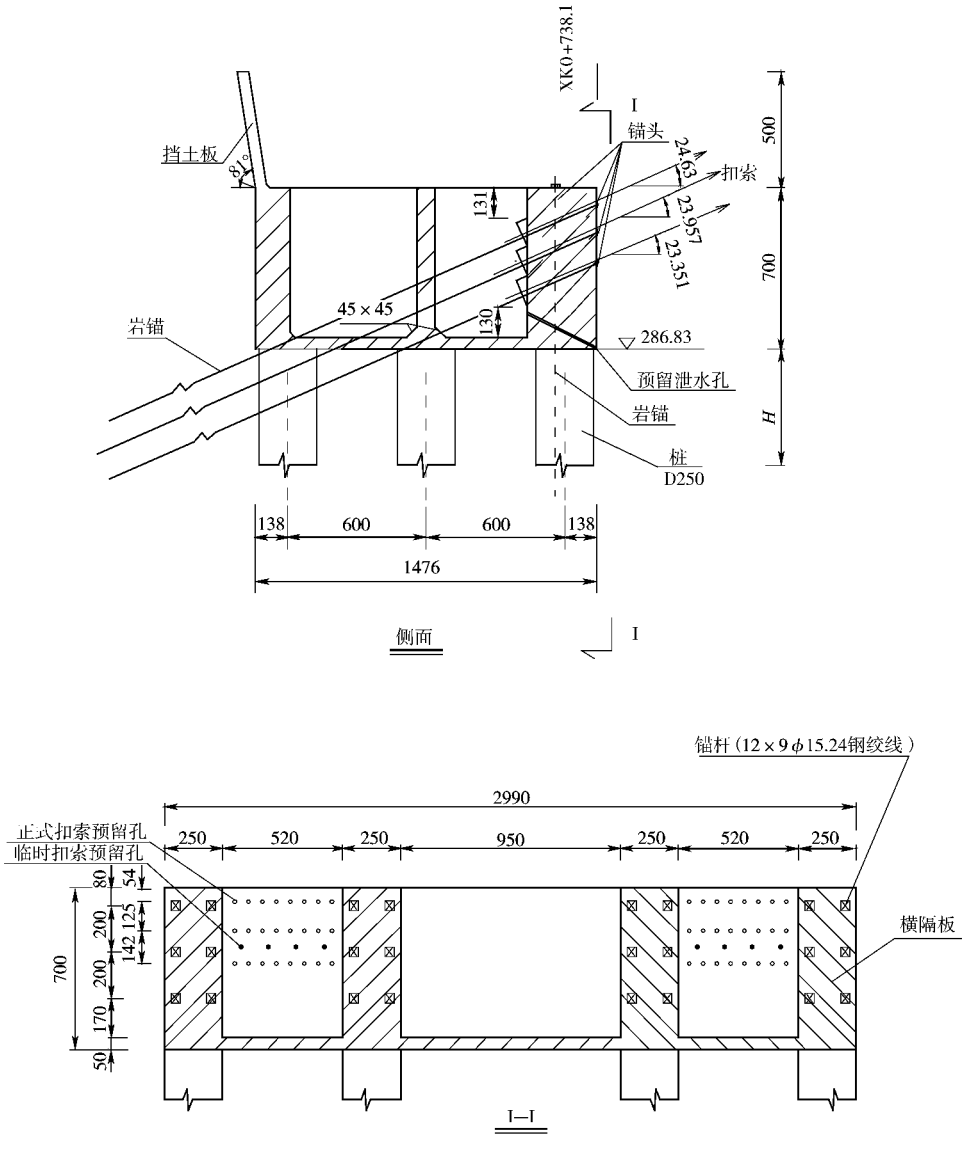


图 3-2-22　扣锚布置示意图（尺寸单位：cm；高程单位：m）

④正式扣索、临式扣索分别设置

1、2、4、6、8 号节段上的扣索为临时扣索，3、5、7、9、10、11 号节段上的扣索为正式扣索。临时扣索采用 Φ47.5 钢丝绳张拉，系于钢管桁架上，锚固于扣塔下或扣锚处。正式扣索用钢绞线，锚于扣锚上，张拉端用千斤顶进行调节。正式扣索每肋每一扣点处设 4 束，每束有 6、8、9、10 根四种，预先编束制作。

巫山长江大桥钢管拱肋节段无支架缆索吊装如图 3-2-23 所示。

⑤正式扣索锚固端采用 P 型锚与专门锚具共同锚固（图 3-2-24）

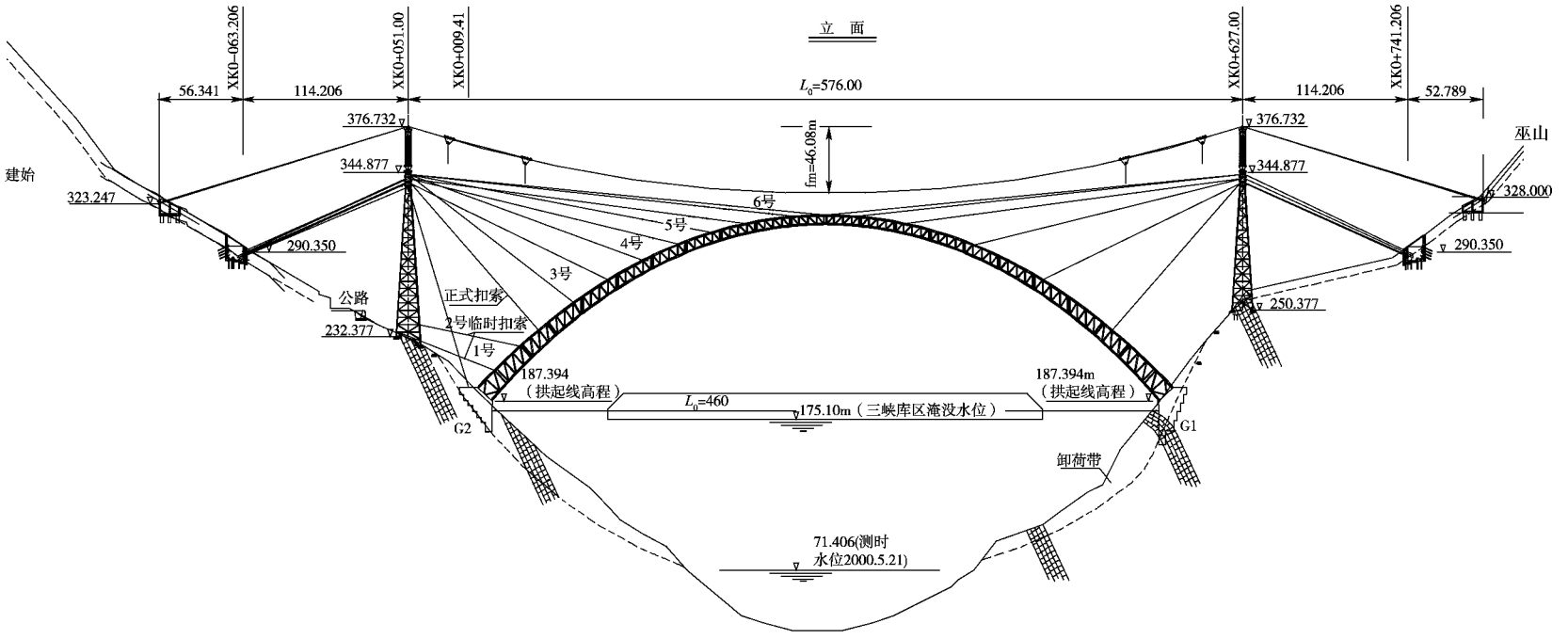


图 3-2-23　**扣索斜拉扣定系统布置示意图(尺寸单位**:m;**高程单位**:m)

锚固端位于拱肋钢管桁架上，在其锚点处设置扣点及转点，在扣点下设有 4 个孔穿过的反力梁，孔径分别为 120mm(1 号、2 号、3 号扣索处)和 140mm(4 号、5 号、6 号扣索处)，反力梁孔的外端面与扣索受力方向正交。

扣索专用锚具由锚头和锚环组成。锚头上根据设计钻有能穿过扣索钢绞线的孔，过孔的所有钢绞线由 P 型锚锁住端头，扣索固定端安装时，将锚头穿过反力梁的相应孔道后，将锚环(内丝口)施入锚头(外丝口)并使锚头外露三丝即可。

图 3-2-24　扣索锚固图

⑥张拉端锚固体系非常规设置

钢绞线扣索受力在 $0.08R_y^b \sim 0.42R_y^b$ 之间，属于典型的低应力状态，张拉端可靠锚固是一大难题，为此开发出了低应力夹片锚固体系。其特点在于用特制压板由外力压住夹片，然后拧紧压紧螺栓，使钢绞线处于低应力时，达到防止夹片松出的目的，同时放、张方便，如图 3-2-25 所示。

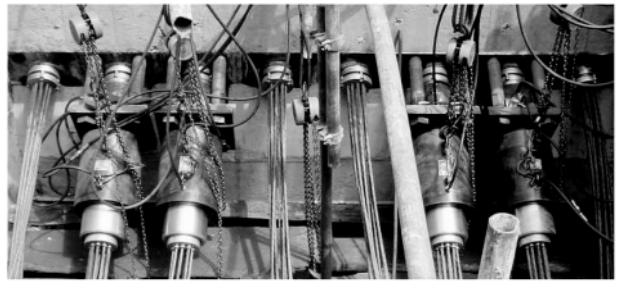


图 3-2-25　扣索张拉端布置示意图

⑦用一对扣索的千斤顶控制调索

本桥拱肋安装用的正式扣索共 6 对，每岸(侧)的一个扣索索号在上、下游肋上各有 4 根索，如每根扣索上全部设千斤顶，则需千斤顶和配套油泵 96 台(套)，是不经济的。经研究，实施中只设了一对索的千斤顶，即实用千斤顶共 16 台。

其实施过程是，首先安置千斤顶在待安拱肋节段的拉索张拉位置，在该段(含上、下游节段及横联)安装完毕后，在安装另岸的节段的期间，调整已安装的其他索号的索力。如此控制及布置后，没有因为调索力而耽误一天的工期，顺利实现了本桥拱肋高精度(相对误差均≤10mm)合龙，如图 3-2-26 所示。

图 3-2-26　合龙后的扣索布置

(3)钢管桁架节段吊运就位技术

①拱肋节段起吊前快速定位

钢管节段从工厂由船运至桥下水域定位。

桥位处于长江黄金水道，根据港航要求，每天只能在 10:00～13:00 之间断航。实施中，在拱肋上、下游的两岸设地锚，用钢绳与定位船连接，完成定位，然后开动运输船连接定位船进行准确就位，此后即可进行节段吊运。

节段起吊前，运输船定位约用 1h，节段捆绑约用 0.5h，起吊至安全高度约 0.5h，因此，一般在 12:00 之前便开放了水域，减少了占用黄金水道的时间，确保了每天安装一个吊装单元（节段）的要求。

②采用 2 组 4Φ56 承重主索同时吊重（图 3-2-27）

图 3-2-27　钢管桁架节段吊运就位

该桥的钢管拱肋节段吊装量为 128t，如用一组主索吊重，会使索鞍处产生很大的压力 P（$P>3000$kN），此力作用于塔顶很不合理。因此，采用间距为 6m 的 2 组 4Φ56 主索同时抬吊一个拱肋钢管节段的吊重方式，全桥横向 2 条拱肋布置 2×2 组 4Φ56 主索，中距 19.7m。在主索纵向设置成双吊点跑车，间距为 18m。

采用两组主索同时吊重，设置横向受力均匀分配体系，确保每端梁吊点处的力均匀分布在 2 组主索上且随时可以自动调整，如图 3-2-28 所示。施工中上游的两组主索和下游的两组主索不同时吊重。

③吊点受力平衡系统

因每节段分为两组主索的 4 个吊点抬吊，保证吊点受力均匀是关键。上、下游的前或后吊点相互连在一起，应均匀受力，而在前或后两个吊点的受力应尽可能均匀。经过节段重心计算，和各节段逐一分析计算，仅第四段捆绑点位置受力最大，为 64.6t，其他的均小于此值。

因此，捆绑点位置确定为上弦靠低端节点及下弦靠高端节点处（图 3-2-28），能满足吊点受力均小于 64.6t，在此情况下，起吊钢绳及吊点滑车组受力在设计要求范围内。

④拱肋节段间接头采用高强螺栓临时连接

钢管桁架节段端头内设法兰盘，就位安装时，用 8 个 M48 的高强螺栓连接（图 3-2-29），紧固后将节段受力交给扣索，同时松去起吊吊点的受力。拱脚设柱形铰轴，便于调整拱轴线，此铰在第 9 段安装完调好拱轴线形后固结。

图 3-2-28　两组承重主索同时起吊拱肋节段

图 3-2-29　拱肋节段间高强螺栓临时连接

⑤高程及轴线测量

轴线采用在轴线上置仪及设后视点直接观测法(钢管桁架节段上预先设置轴线及高程观测点),高程采用 2″级全站仪进行观测,并经常两岸交叉检测校对。

⑥拱肋钢管桁架节段安装设置少抗风索系统

该桥仅在第 5 号拱肋节段处设正式八字抗风索一对,其他节段仅设调位抗风索。5 号段正式扣索采用 4Φ21.5 钢丝绳收紧(收紧力略 200kN)。在吊装至第 8 号段、第 10 段时,风力引起的偏位约达 10cm,因此,在 7 号段、10 号段加设了调位钢丝绳。

通过该桥的实践,特大跨钢管混凝土拱桥拱肋安装时,仅初始的 2～3 段用定位抗风索,此后的节段用较少的横向正式抗风索即可,而拱肋的稳定、轴线位置的准确应由拱肋的自身刚度及加工精度来保证。为减少单肋悬臂的时间,根据尽可能对称的原则,吊装按扣索单元来进行。

(4)拱肋弦管内混凝土压注

本桥为净跨 460m 钢管混凝土中承式拱桥,钢管上弦主管弧长 551.66m,下弦主管弧长 538.26m,净矢跨比 1/3.8,拱顶至拱脚高度约 128m。

每肋上、下弦各 2 根(上、下游两肋共 8 根)ϕ1220×22(25)mm 主钢管内灌注 C60 混凝土,每根主管混凝土方量约 600m^3。

钢管内混凝土压注由两岸分别从拱脚向拱顶方向按设计分段的一、二、三段顺序接力连续泵送施工,每灌注完成一根后,待管内混凝土达到设计强度 80%以后再灌注另一根。

按要求,该桥钢管混凝土膨胀率大于万分之三。

建始岸共用输送泵 3 台,其中同时使用 2 台。

巫山岸共用输送泵 4 台,其中同时使用 3 台。

按设计要求,采用 C60 高强微膨胀混凝土,要具备大流动性、收缩补偿,延后初凝、早强等工作性能,因此要求混凝土拌和坍落度 22～24cm,4h 坍落度损失小于 4cm,扩展度≮40cm,初凝时间 20h 以上(室温 20℃时),砂率 37%～40%。

三、钢管混凝土拱桥的“少扣索吊装”施工

1. 少扣索缆索吊装方案的工作原理

少扣索缆索吊装方案是在复合式缆索吊机进行无支架缆索吊装的基础上加以改进和优化后提出来的,它的特点是将复合式缆索吊机进行吊装转化为“少扣索斜拉扣挂、悬拼小竖转”的吊装工艺。这种施工方法的优点是对施工场地的要求不是很高,具有很强的适用性;同时施工工序也更加简便,所需机械设备更少,所以能减小施工难度、加快施工进度、节约施工成本。

2. 少扣索缆索吊装的施工工序

在进行少扣索缆索吊装方案的设计时先进行详细的计算并确定最终留哪几对扣索,最终留的几对扣索(永久扣索)尽量在拱肋上根据受力大致均匀间隔分布,转换扣索(可以拆除)可采用钢丝绳(也可以采用钢铰线),但必须保证拆除后至少有 2～3 对扣索受力。

永久扣索一般采用钢铰线(由于扣索索力较大),在拱肋合龙之前,通过千斤顶对称(前扣索与后锚索、上游与下游)收放进行调索,以保证各节段控制高程达到设计合龙高程,然后进行拱肋合龙施工,如图 3-2-30 所示。

3. 少扣索缆索吊装方案的特性

少扣索缆索吊装方案的特性是钢管拱肋本身的刚度特别大,这样就可以采用少扣索进行斜拉扣挂,通过扣索收放进行小竖转以调整拱肋高程直至达到设计要求而拱肋变形很小。

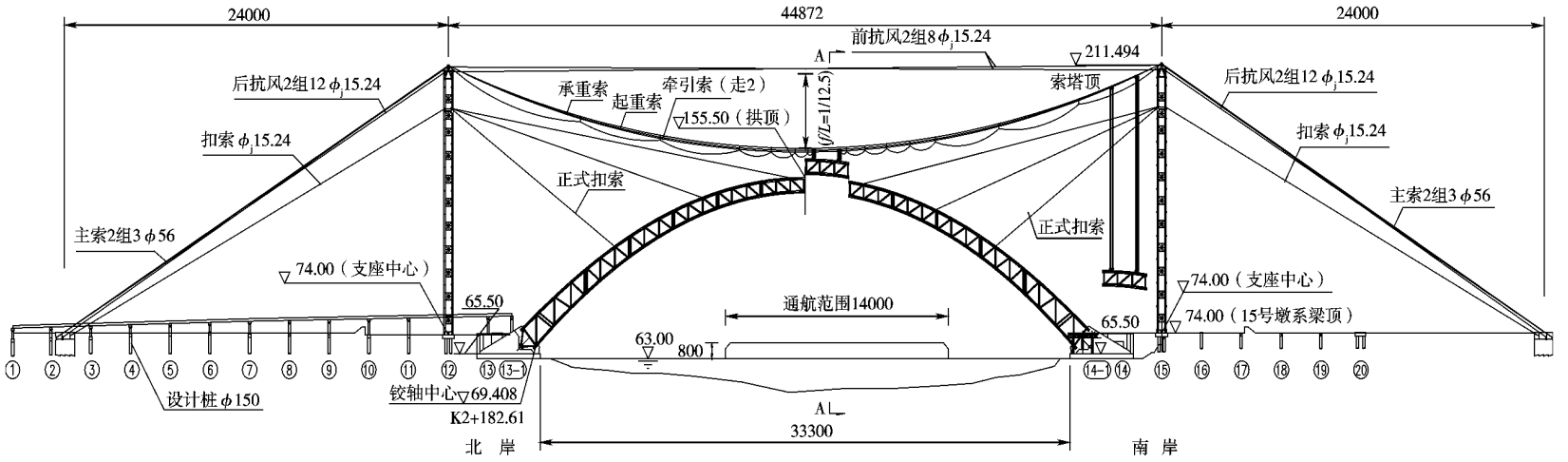


图 3-2-30　**少扣索缆索吊装的施工总体布置（尺寸单位**：cm；**高程单位**：m）

4. 少扣索缆索吊装方案的前提条件

在已合龙的拱肋要能随意抽出其合龙段，则拱肋合龙段截面必须满足的条件如下：

A 截面和 B 截面必须满足(图 3-2-31)：

$M_A=M_B=0$(弯矩)；$N_A=N_B=0$(轴力)；$Q_A=Q_B=0$(剪力)

反之在缆索吊装合龙之前，拱肋合龙段截面也必须满足上述三个条件，则只需 3 对外力(扣索)即能满足上述三个条件。若是对称合龙，则 $Q_A=Q_B=0$，则最少需要两对力(即两对扣索)即可满足合龙条件。所以基于以上理论，对于多节段的钢管混凝土拱桥可以采用最少不少于两对扣索的少扣索缆索吊装方案。

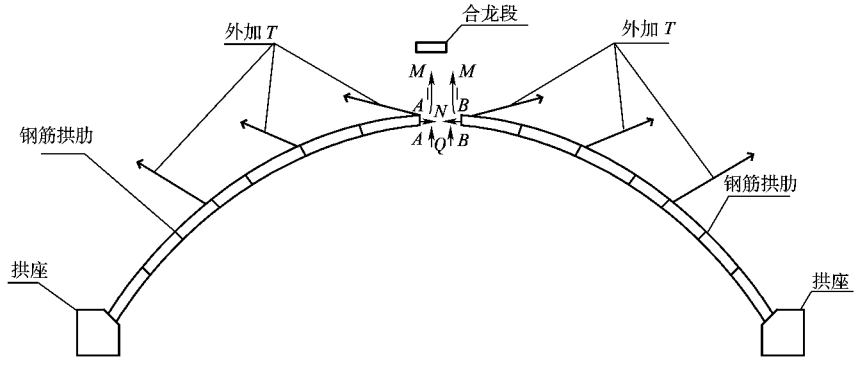


图 3-2-31　少扣索缆索吊装合龙力学分析

少扣索缆索吊装的意义主要有以下两点：

(1)减小施工难度、加快施工进度

随着钢管混凝土拱桥跨径的不断增大，拱肋节段数目也不断增多，如果用少扣索缆索吊装方案，最终留 3 段扣索，则在合龙之前进行高程调整时，只进行 3 对扣索的收放，相对于多扣索方案来说，工序少，所需设备少，施工难度低，施工工期短。

(2)降低施工成本

①少扣索缆索吊装方案的索塔为吊扣合一的索塔，这样就降低了塔高，减少了索塔钢材用量，降低了施工成本(图 3-2-32)。

②少扣索缆索吊装方案的索塔为吊扣合一的索塔，锚碇也为吊锚、扣锚合一的锚碇，这样就减少了锚碇混凝土数量，降低了施工成本。

③多节段钢管混凝土拱桥在受力较小的头几段可采用钢丝绳(受力较大时用钢铰线)作扣索，在后段挂好之后并保证至少两对(或三对)扣索受力时，便可拆除，并且拆除的多余扣索可以进行反复利用。这样可减少扣索钢丝绳(或钢铰线)的用量，并同时减少相对应卷扬机和千斤顶的用量，减少机械操作员，从而节约施工成本。

④缩短工期，降低施工成本。

由于少扣索施工工序少，操作方便，所以可以大大缩短施工工期，从而降低施工成本。

5. 少扣索施工的主要工艺程序

(1)钢管拱肋四点抬吊上船

钢管拱段一般先在预制场制作。为了方便吊装，预制场宜设在缆索吊机的吊装范围之内，以便用预制场的运输台车移运到吊钩下直接吊装。若由于条件限制，必须在其他地方预制，则必须用另外的吊机四点抬吊上船(或平车)，运至桥位处安装。

(2)钢管拱肋四点抬吊起吊及空中翻身

在拱段起吊到距离地面易顶高度时,即可实施拱段翻身。此时一侧的两个吊点的吊绳收

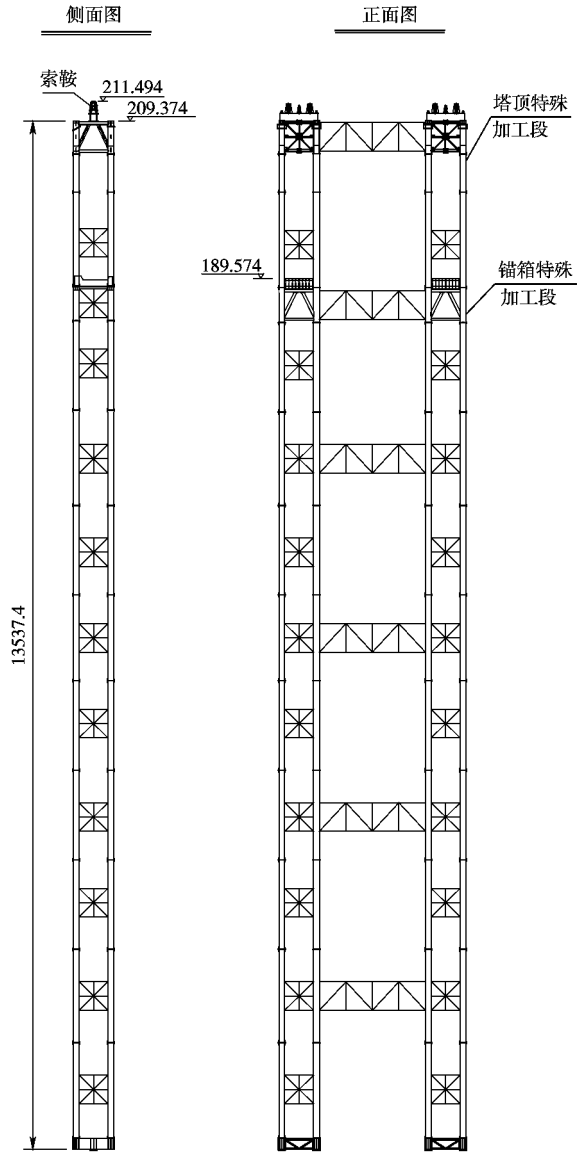


图 3-2-32　少扣索缆索吊索塔结构(尺寸单位:cm;高程单位:m)

紧,另一侧的吊绳放松,即可缓缓使拱段翻身,如图 3-2-33 所示。

(3)正吊正落位

钢管拱肋四点抬吊空中翻身后,即可解除下部两个吊点,仅用上部两个吊点提升拱肋到安装位置,进行安装。如图 3-2-34 所示。

6. 多节段少扣索施工

根据拱圈结构的受力需要,在拱肋安装的全过程始终保持三至四组扣索,以后每在前端增加一组扣索即拆除后面一组扣索,操作简单,受力明确,用最少的扣锚设备完成拱肋安装。

图 3-2-35 为某桥拱肋第三节段吊装完成时的情形。图 3-2-36 为安装一侧合龙段时的情形。

图 3-2-33　钢管拱肋四点抬吊及空中翻身

图 3-2-34　正吊正落位

图 3-2-35　多节段少扣索施工拱肋吊装

图 3-2-36　多节段少扣索施工合龙

四、钢管混凝土拱桥的竖转与平转结合施工

对于跨度较大、跨越的河流航运较为繁忙的拱桥，为了尽量减少大量的高空作业，节省施工设施和施工用材，常选用竖转与平转相结合的施工方法。即在拱脚设置平转的临时转盘和竖转的铰轴，在河流的两岸分别搭设较低的支架，将钢管拱肋在地面拼装连接成两个半拱，然后在拱脚上方安装索塔，用钢绞线扣索通过张拉千斤顶将两岸的两个半拱肋竖转到设计的高度，再利用底部的平转转盘将两个半拱肋平转到设计的桥位，合龙后即可。

以广东丫髻沙大桥为例。该桥主桥为 76＋360＋76(m)的三跨连续自锚中承式钢管混凝土拱桥，其以抗压能力高的钢管混凝土为拱肋，以抗拉强度高的钢绞线作为系杆，通过劲性混凝土的边拱的重力，随着施工加载顺序逐步张拉系杆中的预应力束，以平衡主拱所产生的巨大推力，最终形成对拱座只有较小水平推力的拱桥，使拱座变得相对轻巧。现结合其施工对拱桥的竖转与平转结合叙述如下。

1. 竖转设施

(1)索塔

索塔是拱桥竖转的重要辅助设施，一般为钢结构或钢管混凝土结构，该桥竖转采用钢管混凝土结构，设计为变截面，在纵向为变截面桁架结构，横向为两根钢管混凝土组合柱之间通过三道横撑一道 X 斜撑连成整体。一根立柱通过四根 ϕ600×10mm 钢管混凝土通过 ϕ351×

10mm 的空钢管连接而成，立柱在纵向由塔顶的 2800mm（钢管中心距）变至塔脚的 12000mm，立柱横桥向为 4800mm（钢管中心距）的等截面。两立柱中心距为 35950mm。具体实施阶段将其横向优化为两道桁架直横撑及两道 X 单管斜横撑。索塔分段制作，焊接拼装。索塔与拱脚的连接采用预埋法兰连接。

为增强索塔抵抗塔顶不平衡水平力的作用，充分发挥钢管混凝土的受压承载力，在立柱钢管内设有四束 $18\phi15\times24$ mm 的钢绞线，通过对其张拉，以抵消塔顶不平衡水平分力对索塔立柱产生的拉力。

为使扣索匀顺转向并将支反力传给索塔，需在塔顶设置索鞍。索鞍一般为钢结构，扣索在鞍顶通过滑轮转向，为减小各根扣索钢绞线之间的相互影响，一般采用分束分轮。该桥竖转索鞍采用一束 18 根钢绞线分别置于 18 个小滑轮上，18 个小滑轮组成一组，每拱肋两组共 10 束竖转扣索。制作及安装索塔结构时，要严格控制精度，尽量避免钢绞线与滑轮组之间的横向滑动摩擦，以免由于滑轮的滑动摩擦系数与滚动摩擦系数之差值造成滑轮间歇滚动而造成的冲击力。

(2)拱上撑架

为降低索塔高度及改善主拱受力，一般在主拱 $1/4L$ 处设置撑架。该桥的撑架高 16.5m，其纵向为人字形，2 根 $\phi600\times14$ 钢管通过 5 根 $\phi299\times8$ 平联连为一个整体。横向为 $B=2700$mm（钢管中心距）的等截面桁架。为改善与拱肋连接点处的传力，在拱肋上弦内对应撑架立柱位置设环向加劲钢板。塔顶转向块采用钢板焊接而成。底板厚 20mm，横向采用 3 根 $\phi125\times80\times8$ 作为加劲之用，其上焊接支承扣索的墙板，墙板之间焊接弧形钢板组成扣索通过的滑槽，滑槽下采用 $\phi50\times50\times6$ 作为加劲之用。

(3)转铰

转铰一般采用钢管混凝土铰或钢铰。丫髻沙大桥采用钢管混凝土转轴作铰。转轴支撑于拱座凹形钢板上，转轴与拱座凹形钢板接触面抹黄油以减小摩擦并防腐，如图 3-2-37 所示。

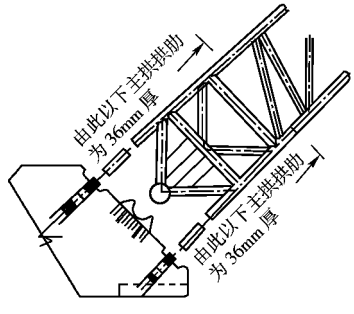


图 3-2-37　竖转铰简图

(4)竖转牵引系统

竖转牵引系统一般采用液压同步提升新技术，丫髻沙大桥根据主跨结构的竖转要求，主跨两肋各设置两组锚点，即锚点组 1 和锚点组 2，用来将 1、2 号扣索固定在主跨结构上。

扣索均采用 $\phi15.24$mm 钢绞线，两组扣索通过塔顶索鞍后分别连接到两组穿心式油缸中，油缸内部穿过 18 根钢绞线，两端还装有可控锚具油缸，以配合主缸对锚片进行控制。主缸伸缸时，上锚利用锚片的自锁原理紧紧夹住钢绞线，而下锚松开，张拉钢绞线一次，使主拱肋竖转一个角度，主缸满行程时，主缸缩缸，使荷载转换到下锚上，而上锚松开。如此反复，即可将主跨竖转到位。

2. 竖转施工

(1)竖转工艺

扣索的张拉端在边拱拱肋的端部，在竖转过程中，主拱拱肋的角度在不断改变，扣索的索力也相应地不断变化。竖转时随施工进程测取的油压值、位移值输入到计算机内，经过计算对泵站比例阀发出控制信号，通过调节流量达到每束钢绞线受力均匀、运动同步，采取以高程为主、索力为辅的原则进行施工控制，具体步骤为：

①扣索①和扣索②预紧至设计索力的 50%，然后将平衡索③预紧至设计索力的 50%。

②分级张拉扣索①和扣索②直至主拱拱肋启动脱架，再将平衡索③张拉至设计索力，保持脱架状态 12h 进行结构观察。

③正式开始竖转，竖转到位后测取边拱支架的内力，进行边拱称重，按从拱脚到拱顶的顺序解除边拱支架的约束，必要时调整边拱端部的配重，使转动体系处于平衡状态。

④在塔顶索鞍部位锁定扣索①、扣索②，并将主拱拱脚临时固结。

(2)施工步骤

第一步(图 3-2-38)：

①在两岸主墩承台上施工下转盘滑道。

②在两岸分别搭设主拱拱肋及边拱劲性骨架拼装支架。

图 3-2-38　拱肋劲性骨架拼装支架

第二步(图 3-2-39)：

①安装边拱劲性骨架、主拱拱肋及横撑。

②安装拱座索塔。

③灌注边拱及索塔钢管混凝土，浇筑边拱横隔板、端横梁及拱肋压重混凝土。

图 3-2-39　拱肋安装示意

第三步(图 3-2-40)：

安装竖转扣索及其张拉设备。

图 3-2-40　安装竖转扣索及其张拉设备

第四步(图 3-2-41)：

同步张拉各扣索，将主拱肋竖转至设计高程。

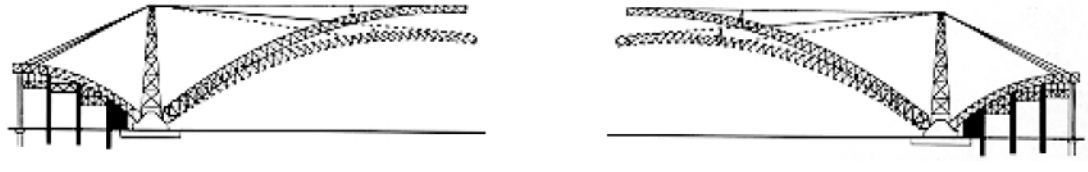


图 3-2-41　张拉扣索图

3. 平转施工设施

(1)上转盘

上转盘由拱座、撑脚、中心转轴等组成，转动体系的重力由撑脚传给下转盘，中心转盘仅起

定位作用。为保证上转盘各种预埋件的精确度，并且加强上转盘的整体性，在上转盘内设置劲性骨架。

撑脚为转动体的主要承重件，丫髻沙大桥每拱座上设 7 个，分为两种类型。靠两端的为加强型撑脚，由 3 根 ϕ800×14 钢管混凝土短柱组成；其余为普通型撑脚，由 2 根 ϕ800×14 钢管混凝土短柱组成。撑脚上端埋于拱座内，下端设千岛走板供转动时上下转盘沿下转盘滑动。如图 3-2-42 所示。

(2)下转盘

①下转盘由环道、牵引系统、中心转轴等组成。环道直径为 33m、宽 1.1mm，由环向钢板和环向型钢劲性骨架组成，两者之间的连接采用栓接。环道钢板预留槽内要灌注混凝土，并在钢板下部焊接加劲肋，以增大其刚度。为减小环道与走板之间的摩擦系数，在环道钢板表面粘一层 3mm 的不锈钢板。

②牵引系统。牵引系统包括牵引钢绞线、2 组牵引千斤顶(每组 4 台)、多台辅助千斤顶组成，设计启动摩擦系数 $\mu_S=0.1$、转动摩擦系数 $\mu_d=0.05$，实测：$\mu_S=0.06$、$\mu_d=0.03$。

③中心转轴。中心转轴主要起定位作用，由上、下钢板、钢板间蘑菇头、中心定位轴、定位轴与转轴间四氟套组成。中心定位轴为 $D=300$mm 的钢棒。

下转盘和牵引系统的布置如图 3-2-43 所示。

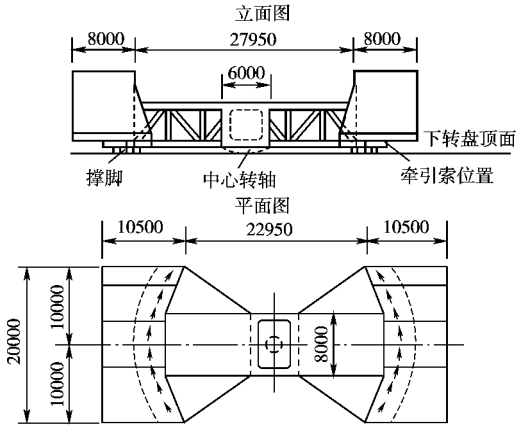


图 3-2-42　上转盘构造(尺寸单位：mm)

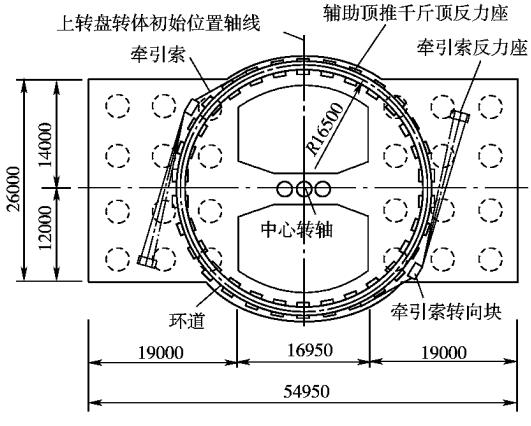


图 3-2-43　下转盘平面布置图(尺寸单位：mm)

4. 平转施工步骤

(1)调试牵引系统，清理、润滑滑道，拆除有碍平转的障碍物。

(2)先使辅助千斤顶达到预定吨位，再启动牵引千斤顶使转动体系启动，然后由牵引千斤顶拉动牵引索平转，如图 3-2-44 所示。

(3)在平转就位处设置限位卡梁，阻止撑脚到位后继续前行。

(4)平转基本到位后降低平转速度，采用点控牵引方法对好主拱拱肋的中线。

(5)恢复边拱支架，焊接上、下转盘的钢骨架，绑扎钢筋，清除杂物后浇筑上、下转盘间的混凝土，如图 3-2-45 所示。

(6)放松并拆除扣索，如图 3-2-46 所示。

(7)固接主拱脚，拆除索塔，如图 3-2-47 所示。

5. 合龙控制

平转施工完成后，按照合龙的温度修正值于半夜调整好主拱拱肋的高程，然后立即在主拱拱

顶安装临时合龙构件，使之能承受两铰拱状态的温度力，保证合龙段在无应力状态下定位、焊接。

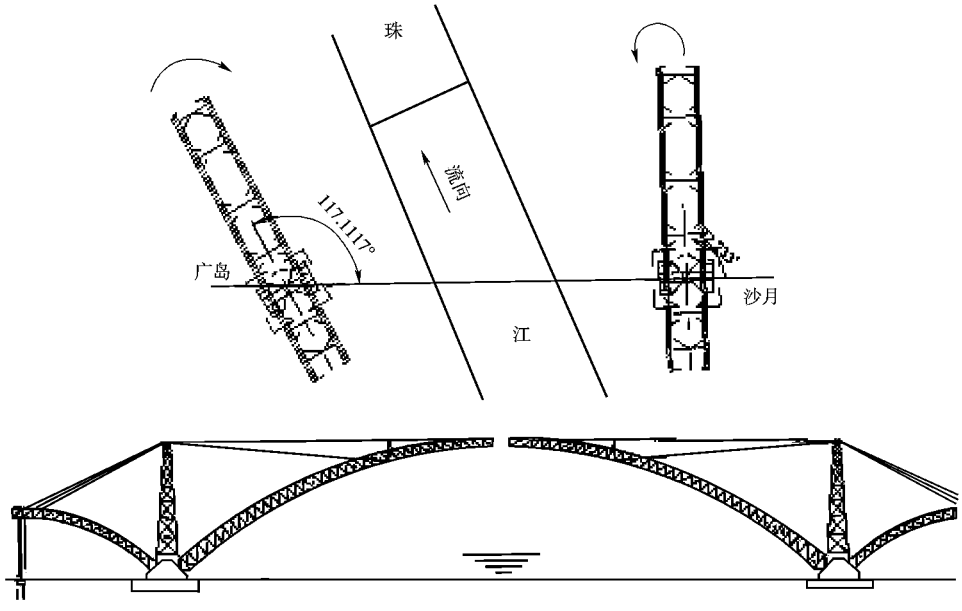


图 3-2-44　拱肋平转施工示意图

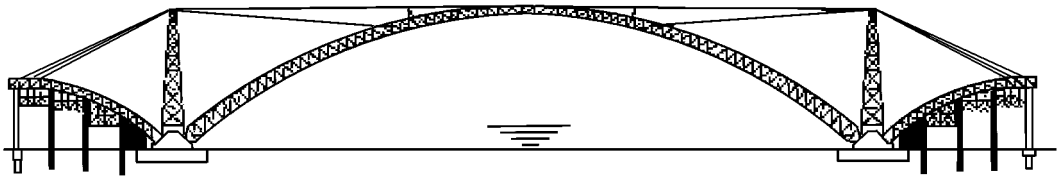


图 3-2-45　恢复边拱支架

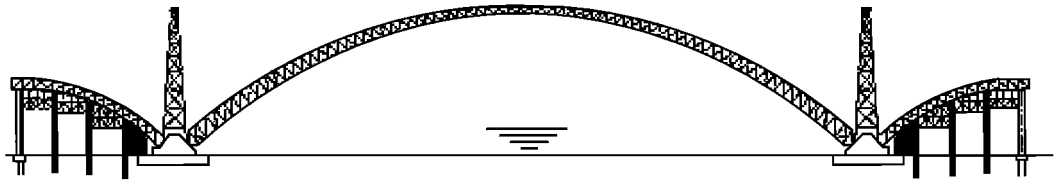


图 3-2-46　放松并拆除扣索

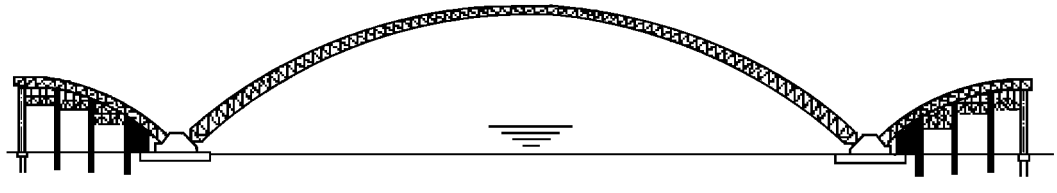


图 3-2-47　主拱脚固接

五、高性能钢管微膨胀混凝土配制

为了充分发挥钢管套箍作用，在钢管内灌注高性能微膨胀混凝土，以提高钢管的承载能力，提高构件的稳定性。在钢管中灌注的一般是 C40～C50 的高性能微膨胀混凝土。该混凝

土施工要求早期强度高、高流态、缓凝、自密实及可泵性非常好，而且管内混凝土为微应力混凝土。因三向应力混凝土的主要特性是强度高、变形性好，在外荷载作用下，由于钢管约束其内部核心混凝土的横向变形，使在三向应力作用下的核心混凝土的强度比普通浇筑的混凝土提高了 2～3 倍。普通混凝土受压的压缩应变≥0.002 时，出现纵向裂缝而破坏。三向应力作用下的混凝土可看作弹塑性材料，当压缩应变达 0.002 时，不但仍有承载能力，而且表面不发生裂缝，它是一种很好的抗震材料。所以设置微应力，可提高构件的承载力及改变普通灌注法造成混凝土和钢管间有间隙的现象。对此，如何确定合适的混凝土的微膨胀率和配合比是关键因素。

1. 材料

(1)水泥

配制高性能微膨胀混凝土要求使用干净的河砂。使用时，必须考虑到砂中的云母含量、硫化物含量、含泥量和压碎指标值，该四种指标对混凝土强度和对钢筋的腐蚀性影响都非常大。因此，对该种河砂专门供应。对砂进行上述三种指标值的测定，严格按高标准控制砂中云母含量、硫化物含量、含泥量及压碎指标值，并且，此种混凝土对细度模数也有较高要求，细度模数选用 2.6～3.1 的中砂为宜。不宜选用砂岩类山砂、机制砂、海砂，此类砂对膨胀混凝土的膨胀率影响较大。

(2)细骨料

配制高性能微膨胀混凝土要求使用干净的河砂。使用时，必须严格按高标准控制砂中云母含量、硫化物含量、含泥量及压碎指标值，并且细度模数选用 2.6～3.1 的中砂为宜。不宜选用砂岩类山砂、机制砂、海砂。

(3)粗骨料

骨料的品质对高性能微膨胀混凝土有很大的影响，主要体现在骨料-砂浆界面粘结强度、骨料弹性模量和骨料的强度。在考虑该种混凝土的可泵性的同时，要考虑混凝土的早强性和后期强度。卵石混凝土的可泵性很好，但混凝土中砂浆和卵石的界面粘结力较差，强度较低，造成水泥用量过高。碎石混凝土的可泵性较差，但早期和后期强度较高。有的碎石采用含硅质的岩石，在此类岩石中由于 SiO_2 对混凝土影响很大，所以在配合比设计中应全面考虑其影响因素，一般不用此类碎石。为提高混凝土和易性可以用碎石和卵石双掺的方法，也可以增大砂率用碎石单独作粗骨料。使用碎石需经过二次破碎，使碎石基本无棱角，并减少针片状颗粒的含量。碎石和卵石的粒径都控制在小于 30mm。在配制时，应控制粗骨料中的含泥量，并且重视本身的强度和骨料的弹性模量。

(4)掺合料

在高性能混凝土使用粉煤灰已相当普遍。该材料来源广泛，价格便宜，可减少环境污染，是值得推广的外掺料。粉煤灰主要的四种化学成分，掺入混凝土内在水泥水化过程中，能与分解出来的 $Ca(OH)_2$ 起化学反应，生成具有胶凝性的水化产物。这些水化产物，能在空气中硬化，逐渐具有水硬性，所以也称“二次水化反应”。该新生凝胶封住了毛细管路，增强了混凝土的密实性。因此，粉煤灰能取代部分水泥，从而节约水泥，降低水化热，使混凝土升温降低 15%～35%。二次水化反应主要取决于粉煤灰中的硅酸盐和铝硅酸盐微细颗粒的含量，同时也取决于粉煤灰的细度。细度越大，水化触及面越大，二次水化反应越充分，且“二次反应”产生的凝胶封堵了毛细管路，增强了密实性，提高了混凝土的耐久性。这种“二次水化反应”只有Ⅰ级粉煤灰和磨细粉煤灰可以彻底完成。所以，掺加Ⅰ级或磨细粉煤灰是很有必要的。

但使用粉煤灰时，还应严格控制 SO_3 的含量。因硫酸盐与硅酸盐发生反应后，生成钙矾石。如 SO_3 含量过大，生成的钙矾石过多，则会引起混凝土体积不稳定，降低混凝土耐久性。这种现象在学术上称为“水泥杆菌”。所以，配制高性能微膨胀混凝土时，粉煤灰中 SO_3 含量应控制在 0.5%～1.5%。并且，在配制高等级、高性能的微膨胀混凝土时，掺用粉煤灰，它可以起到减少水泥用量的作用，也可以起到增加混凝土的和易性、可泵性、提高混凝土的强度的作用，并可降低混凝土中的水化热，提高新拌及硬化混凝土性能。配制 C50 及以上的高性能微膨胀混凝土必须掺用外掺料，并应掺加 I 级或磨细粉煤灰。如掺 II 级及以下的粉煤灰，会造成强度降低，混凝土干缩增大。粉煤灰的技术指标，应符合现行用于水泥和混凝土中的粉煤灰相应标准的规定。

(5)外加剂

高效减水剂能使水泥起到分散作用，以改善混凝土的和易性并相对地释放出一部分水，在维持 W/C 不变时，可以减少立方用水量，减少由于多余的水分蒸发而留下的毛细孔体积，且孔径变细，结构致密，同时水化使生成物分布均匀，这对于减少混凝土的收缩，提高混凝土的密实性是很有好处的。W/C 不变，立方水泥用量可以减少，从而对于减少水化热、降低混凝土温度也起到了很好的效果。有的减水剂掺有缓凝成分，能抑制水泥初期水化作用，这就有可能使温升速度缓慢，可改善混凝土的密实性、黏度等。所以，高效减水剂是配制高性能混凝土的主要成分。国内这种减水剂主要是萘系高效减水剂及密胺树脂类高效减水剂。由于钢管混凝土在整个灌注期间，混凝土是蠕动的，需一定的运输和泵送时间，且钢管混凝土在灌注后无法排出气泡及养护。所以对外加剂的选择尤为重要，因外加剂掺在不同膨胀剂的混凝土中产生的效果不同，选择外加剂一定要多次试验后方可使用。根据试验，缓凝型减水剂会降低混凝土膨胀率，所以，掺加缓凝型减水剂时应多次试验，认为混凝土膨胀率合适才可使用。配制高性能微膨胀混凝土选用的高效减水剂应具有缓凝作用或是高效减水剂和缓凝剂搭配使用，且是非引气型、低气泡的减水剂。此类高效减水剂的质量应符合现行国家标准《混凝土外加剂》等相应规定。

(6)膨胀剂

混凝土中掺加膨胀剂，在水泥硬化过程中，形成大量体积增大的结晶体——水化硫铝酸钙 $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$(又名钙矾石)。它能产生一定的膨胀能，在有钢管约束条件下，在结构中建立 0.2～0.3MPa 预应力，可抵消混凝土在硬化过程中产生的收缩应力，从而能使混凝土中的孔隙减小，毛细孔径减小，提高混凝土的密实性，混凝土的抗压强度和轴心抗压强度也成倍地增长，这时膨胀能转变为自应力，使混凝土处于受压状态，从而提高抗裂能力。所以微膨胀混凝土在有应力情况下，自身的强度远远大于设计值，其强度保证率大于 97%。

选择膨胀剂一定要多试验几个品种，膨胀剂应对混凝土后期强度及质量无损害，与所用水泥适应性好。在我国主要是使用 U 型膨胀剂、复合膨胀剂及明矾石膨胀剂。

2. 设计高性能膨胀混凝土的几个问题

(1)试配强度

混凝土的施工配制强度应高于设计要求的标准值，以满足强度保证率的需要。标准差的确定，可按一般高性能混凝土的设计方法进行配制强度的计算，不需要计算后按高一级强度等级的强度值作为施工配制强度，主要一点在于进行施工配合比的验证工作。该种微膨胀混凝土设计强度一般为 C40～C50，根据以往的经验和高性能混凝土的设计原则，应控制水灰比，把水灰比确定为定值。实践表明，W/C 小，膨胀时间延长，不利于钢管受力；W/C 大，则膨胀发

挥较早，强度下降，对提高结构受力不利。由于 W/C 对钢管混凝土的膨胀系数影响很大，所以在设计过程中一定要进行多次试验，控制好 W/C；然后，进行各种材料用量的调整。

(2)砂率的确定

由于在高性能混凝土的设计中，砂率是根据测得砂、石混合最小空隙率[a=(表观密度－容重)/表观密度]计算而来，该计算值为最佳砂率。在配制高等级、高性能混凝土过程中尤其重要。但钢管混凝土的灌注过程和一般高等级混凝土的灌注过程不一样，该种混凝土是采用在钢管中顶升灌注，在顶升的过程中，混凝土要有极好的和易性。粗骨料在顶升过程中不会由于自身的重力作用而下落，否则会造成顶升压力过大而失败。在设计混凝土配合比过程中混凝土中碎石应稍微呈悬浮状态，不能下沉，所以该种混凝土的砂率可提高一些。由于提高了砂率，会造成混凝土的水泥用量比原来要大些，膨胀率会小些。但只要能保证灌注的钢管混凝土后期为无应力或微应力即可。

(3)凝结时间的确定

由于钢管混凝土一般都采用顶升灌注法，在顶升的过程中，不允许混凝土初凝，所以在设计中就应考虑掺加高效减水剂或缓凝剂，以延缓混凝土的凝结时间。但掺加缓凝剂会减少混凝土的膨胀率，这样就产生了相互矛盾。为解决此问题，在膨胀值不符合设计要求的情况下，可掺加矾土水泥或石膏，或在现场进行模拟试验。以确定在什么膨胀条件下，既可保证钢管混凝土的饱和度，也可在允许的范围内，增大高效减水剂的掺量，使缓凝延长。但掺用范围应严格控制试验，掺量过大，会引起泌水及和易性降低。这样几个方面同时进行多次试验，就可解决缓凝条件下混凝土的膨胀率问题。

(4)掺量

一般来说，在保持坍落度、水灰比、减水剂掺量不变的情况下，随着内掺 U 型膨胀剂的增加，混凝土的限制膨胀率增加，混凝土强度下降，而坍落度损失增大，所以根据工程设计要求，经过多次试验，选择合适的膨胀剂掺量是极其重要的。

(5)膨胀值的确定

钢管拱桥混凝土一般都是在限制条件下膨胀，膨胀值小，则钢管中混凝土会与钢筋间产生空隙，造成钢管与混凝土无法连成整体，受力降低；而膨胀过大，则在钢管内部形成很大的自应力，就会破坏混凝土内部结构，钢管本身一直在横向自应力的受力情况下，对本身结构受力有很大影响。因此，膨胀混凝土应有一个宜于控制的较大膨胀值范围。根据施工实践，我们认为钢管混凝土设计为无应力或微应力时，膨胀混凝土限制膨胀率 28d 控制在$(2\sim6)\times10^{-4}$的膨胀值是合理的。经现场超声波检测，可达到饱满、密实、无空隙，经测试其动静载试验都达到设计要求。所以在控制无应力或微应力钢管桥中膨胀混凝土的膨胀值时，可考虑较大范围，这样易于控制，不至于因膨胀值微小的变化，造成构件结构受力的破坏。

六、钢管混凝土中承式拱桥竖转施工实例

1. 概况

如图 3-2-48 所示，某运河特大桥，钢管混凝土中承式拱桥，主跨度 235m，主拱高度 58.75m，竖转角度 25.994°，两组扣索的最大受力值分别：565.39t 和 608.89t。

2. 主要技术指标

桥梁主跨度：235m。

主拱肋高度：58.75m。

竖转最大角度：26°。

提升钢索最大索力：4758kN。

提升钢绞线：**直径** ϕ15.24mm，**抗拉强度** 1860kN/mm^2，1.1kg/m。

液压油缸：2000kN **额定压力**。

穿芯结构：18 **束/根**。

锚具系统：CBF-E10-ALP **齿轮泵，理论流量** 14.5L/min，**额定压力** 16MPa，**辅助电机** Y100L2-4 **型，额定转速** 1440r/min，**额定功率** 3kW。

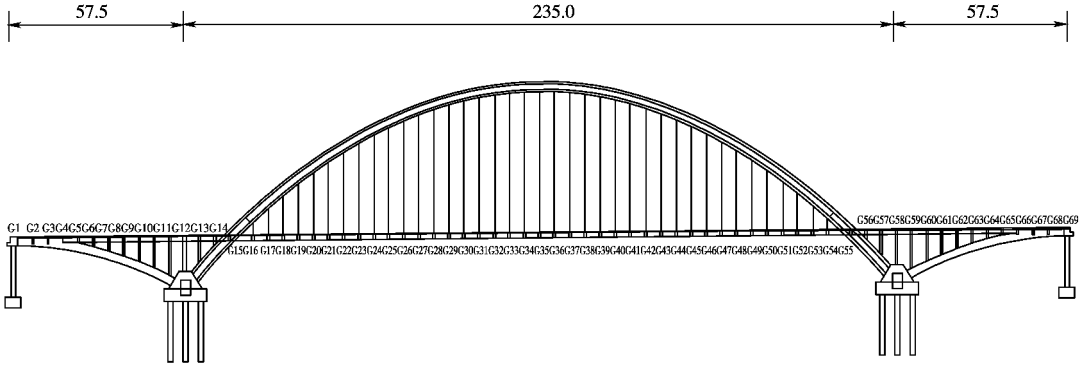


图 3-2-48　**某运河大桥主桥总体布置图(尺寸单位**：m)

提升系统：25SCY14-1B **手动变量柱塞泵，额定压力** 31.5MPa，**额定转速** 1500r/min，**全开实际流量为** 35L/min，**主电机为三相异步电动机，额定转速** 1460r/min，**额定功率** 15kW。

3. **施工技术方案及工艺程序**

(1)**施工总体布置**

施工总体布置原则如下：

①**满足竖转施工的载荷要求，并应使每台提升设备受载均匀**。

②**满足工程施工过程控制要求，尽量降低施工系统复杂性，增加过程控制的可操作性**。

③**提高设备利用率**。

④**考虑系统的安装方便性、系统维护的可能性，降低施工风险**。

⑤**徐州岸拱脚段和第二段在岸上拼装，考虑到节段、运输吊装能力，将该两段拱肋进一步分小节段，运至施工现场拼装**。

(2)**具体布置**

根据主跨结构竖转提升要求，主跨钢管桁架拱肋设置两组锚点，扣索均采用 ϕ15.24mm **钢绞线。两组扣索通过主塔上的索鞍分别连到油缸中。穿心式千斤顶是竖转设备的执行机构，其内部分别穿过** 18 **根钢绞线**(1 **号扣索**)、13 **根钢绞线**(2 **号扣索**)，9 **根钢绞线**(3 **号扣索**)**两端还设置可控制的锚具油缸，以配合主缸对锚具进行控制**。

根据主墩宽大、承载力高的特点，将主索塔布置在主墩承台上。根据索塔的受力特性，采用万能杆件进行组拼而成空间桁架，索塔上方设置索鞍。根据主拱肋竖转过程中受力状态，在距主跨中心线 57.5m **处设置反力塔架，塔架采用** ϕ600×12mm **和** ϕ400×8mm **钢管焊接而成，** ϕ600 **钢管内灌入** C50 **混凝土，反力塔架上设转向块，**1、2 **号扣索通过主索塔、反力索塔，一端扣于主跨锚点处，另一端扣于边拱肋张拉系统中，扣索采用** ϕ15.24 **钢绞线**(1 **号索为** 2×18×15.24**钢绞线、**2 **号索为** 2×13×ϕ15.24 **钢绞线、**3 **号索为** 9×ϕ15.24 **钢绞线**)。

合龙段设在主拱肋中间，待主拱肋竖转到位后，即在拱肋上安装吊装系统，将合龙段垂直起吊就位实现主跨合龙。

(3)竖转提升速度

竖转提升速度取决于液压提升控制设备的流量、锚具切换和其他辅助工作所占用的时间。京杭运河特大桥竖转设计提升速度为 2m/h，半跨整体竖转过程历时 8h。

(4)竖转施工主要施工工艺

根据施工现场的地理环境及航运防汛要求，桥竖转施工分 7 个步骤进行，如图 3-2-49a)～g)所示：

①进行主拱基础、承台施工，同时精确安装主拱钢管桁架预埋钢管和施工所用的活动铰和索塔预埋件。

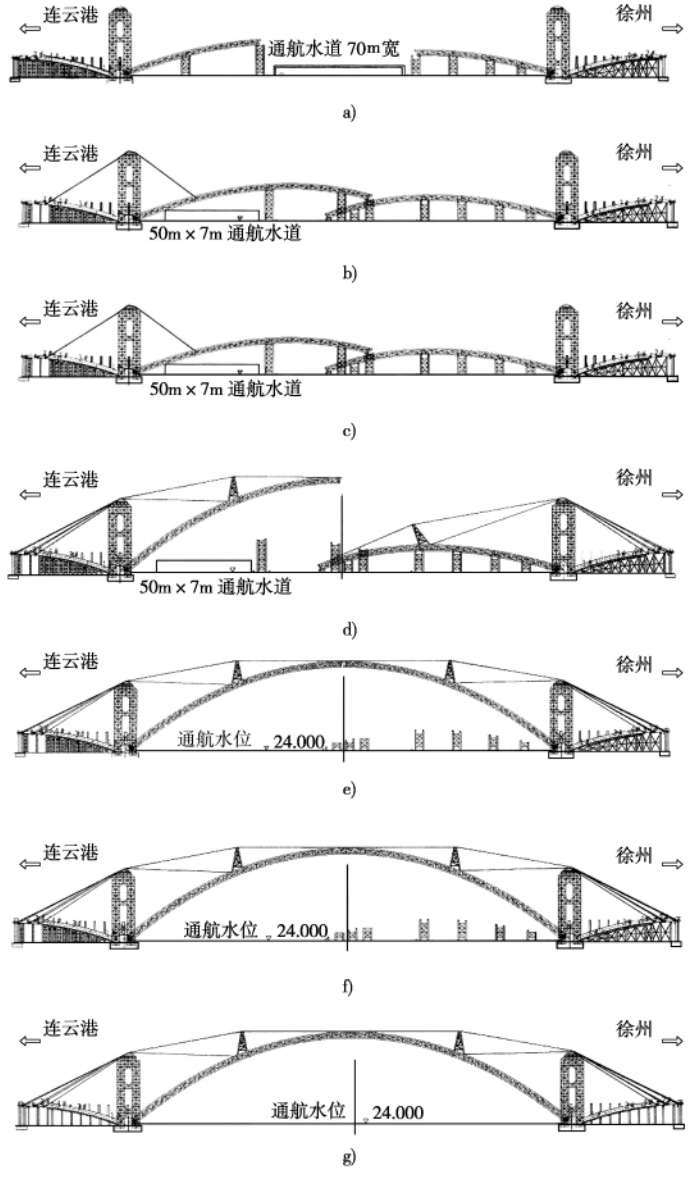


图 3-2-49　主拱肋竖转施工程序图(高程单位：m)

②如图 3-2-49 所示，在大桥设计桥位投影下方河道上搭建钢管桩支架及拼装工作平台，连云港侧搭设 1、2 号支架，徐州侧搭设 6、7、8、9 号支架。在 2 号支架与 6 号支架之间预留出 70m 宽安全通航水道。在已建钢管桩支架上修建工作平台和安全防护设施，并在钢管桩周围设置防护桩，以保证施工全过程的安全。上述钢管桩支架、工作平台及防护设施施工完成之后，分别利用水上吊运设备和陆上吊运设备进行连云港侧、徐州侧钢管桁架节段就位拼装和活动铰安装定位。在这一过程中组织协调人员及机械设备完成两岸主索塔的拼装。

③安装并张拉边拱肋平衡索和连云港侧主拱肋临时扣索，拆除连云港侧支架 1，在该处预留出 50m 宽、7m 高的安全通航水道，并搭设河道中央水中钢管桩支架编号 3、4、5，完成余下连云港侧半跨钢管桁架拼装，同时安装反力扣塔、竖转扣索及主拱肋锚固点 1、2。

④竖转连云港侧主拱肋到设计高程，改造河道中央水中钢管桩支架编号 3、4、5，完成徐州侧钢管桁架和横撑的拼装，并按施工设计要求，安装反力扣塔、主拱锚固点、主拱竖转扣索、平衡索。

⑤竖转徐州侧主拱肋到设计高程。此施工流程中拆除钢管支架 2 及施工工作平台，安装合龙段吊装设备。

⑥拆除河道中央钢管桩支架 3、4、5 及工作平台，船运合龙段到设计吊点位置，按施工设计要求吊装合龙段并焊接合龙。

⑦拆除合龙段吊装设备，按设计要求封固主跨拱脚，拆除余下施工用钢管桩支架。根据总体施工组织设计，逐步拆除提升扣索、反力扣塔和主索塔。

4. 竖转关键设施的技术设计

竖转施工设施技术设计主要包括索塔、索鞍、支撑反力架、锚固点、拱脚转铰和张拉索股的设计，以下分别予以介绍。

(1)索塔

索塔可采用钢管混凝土桁架柱。其施工方便、安全、节省材料，但完工后拆除不方便。本桥采用万能杆件拼装索塔。索塔安装和拆除方便。索塔由万能杆件预埋在拱座中与拱座固接，拱座以上均采用双肢连接直到塔顶，在塔顶与索鞍连接处为加强连接部位的强度，减小杆件的局部应力，此处采用四肢连接。为了使索鞍吊装就位顺利进行，在索塔顶设计一个悬出的吊梁，索鞍从吊梁处提升，由滑道采用滑移器滑移至预定位置。索塔结构形式如图 3-2-50 所示。

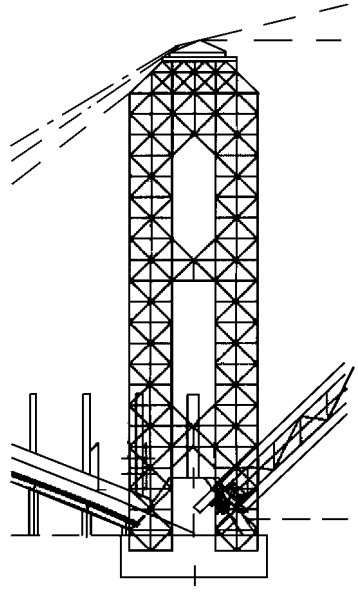


图 3-2-50　竖向转体索塔布置

(2)索鞍

索鞍设计的关键是拉索的接触面大小和转向角度、索鞍的强度和转动轴的抗剪强度大小、转动轴的摩阻系数降低措施等。索鞍的立面及展开平面图如图 3-2-51 所示。侧向隔板与辊轮之间用四氟板隔开，滚轮和辊轴以及滚轮和拉索间用四氟粉和黄油润滑，以减少它们之间的摩阻力。

由于拉索在转体过程中，受到“提篮”式拱肋的影响，使得索力产生侧向力，滚轮与侧板产生侧向摩擦，因此，在侧板与滚轮间设置四氟板以减小摩擦。

滚轮和辊轴的构造形式及相对位置如图 3-2-52 所示。每个辊槽放置 18 根钢绞线拉索，在辊槽上设置挡板，以防拉索在

竖转滑移过程中侧向滑移而崩出轮槽。

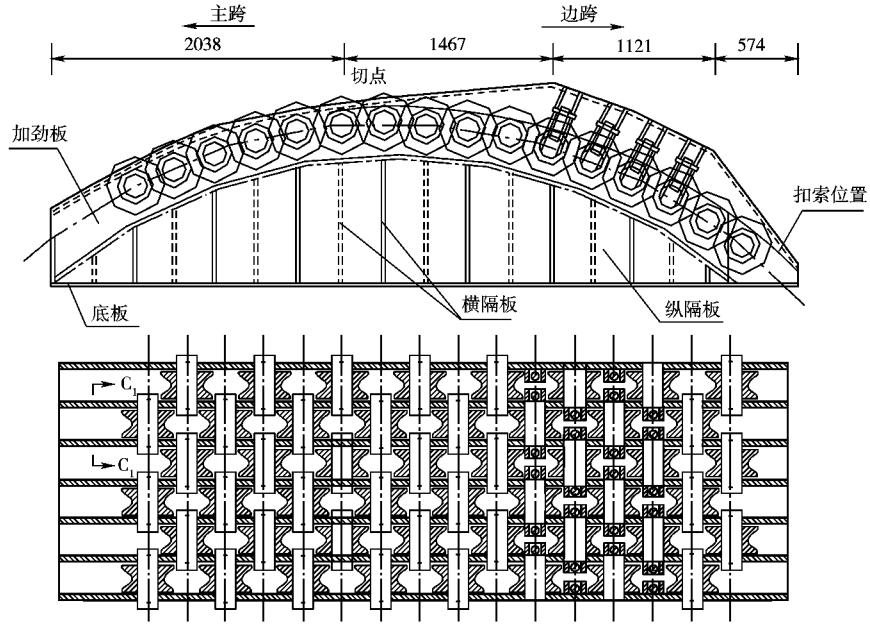


图 3-2-51　索鞍布置图(尺寸单位:mm)

(3)支撑反力架

该结构是在转体过程中平衡主拱肋内力和位移的辅助临时构件,在拉索按一定比例的拉力进行张拉时,通过支撑反力架可以协调结构内部的内力和位移的平衡,使得主拱肋按设计的状态进行全过程转体。支撑反力架采用钢管加工而成,完成施工后割除。它除了强度计算外,还要进行稳定性计算。在拱肋和支撑反力架焊接处,主拱肋弦管内外应用环形加劲板焊牢以免支撑处弦管变形或局部失稳,反力架顶用钢转向块,使拉索通过转向块平滑转向。反力架结构形式如图 3-2-53 所示。

(4)转体活动铰

如图 3-2-54。该桥采用钢轴形式,大大减小了转体活动铰的外形尺寸,消除了钢管混凝土轴结构不密实的施工隐患,并减轻了活动铰安装调节质量,确保了施工安装精度的实现。因为制作工艺的简化,缩短了转体活动铰的施工周期,整体工程施工的进度得到了保证。

针对活动铰安装精度的施工难点,在转体活动铰的结构设计中增加了预埋钢板初定位的施工环节。通过预埋钢板的安装,将活动铰支座的安装斜面在空间上确定下来,然后根据预埋钢板上准确的机加工地脚螺栓孔位,一一对应安装地脚螺栓,并精调至设计位置,这样在三维坐标上就实现了对支座安装位置的确定。支座运抵施工现场后,用吊装设备吊运到预埋钢板上方,将活动铰支

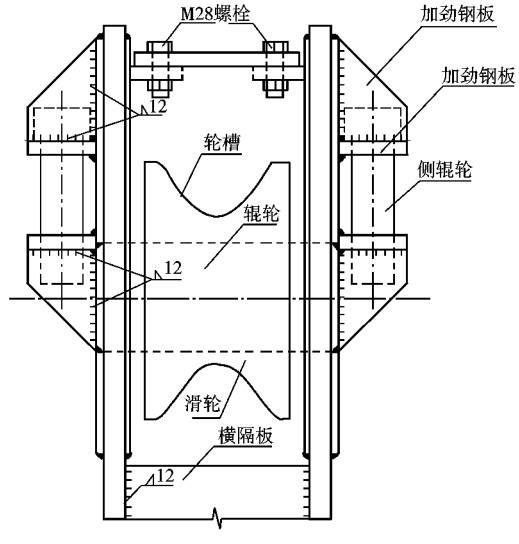


图 3-2-52　滚轮和辊轴的构造(尺寸单位:mm)

座上预留的定位孔对应预埋的各个螺杆，进行就位安装，即可实现转动铰的精确定位。活动铰结构经过这样的处理，将复杂结构的精确定位安装，降低到简单构件的安装工序上，简化了施工工艺。施工难度也从安装上转移到最初的结构加工上，而结构加工精度通常是相对容易控制的。

该桥转体活动铰转动轴外形尺寸为 ϕ402×2500mm，采用 Q235 钢锭加工制作，通过打磨处理，使轴表面光滑易于转动。钢轴与拱肋桁架的端头通过定位钢板实现连接，钢轴与定位钢板连接处用焊缝焊接固定，转轴两侧的拱座预留槽上安装限位支座，防止转铰在转动过程中发生横向位移。

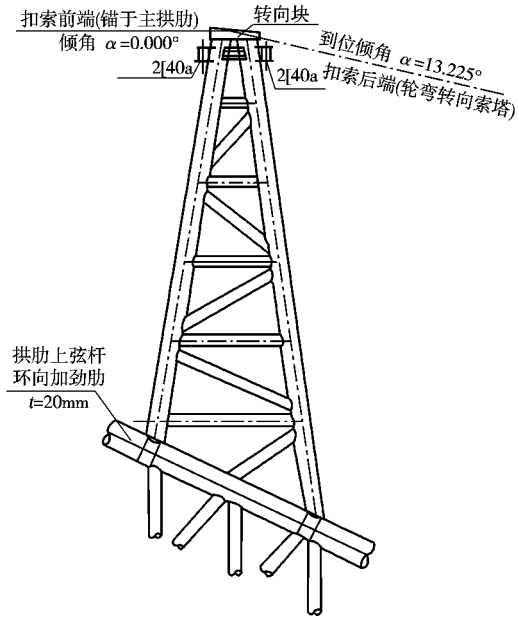


图 3-2-53　反力架结构布置

(5)锚固点

锚固点是拉索锚固定位点，它的安全可靠是竖转施工成功的关键，锚固点由锚箱和 P 形锚组成，为了锚固万无一失，在锚箱的内部用环氧砂浆进行压注，以防锚固点的滑丝。锚点处应由加劲板进行加劲处理，锚点处拉索由锚点通过转向块向后拉紧。锚固点有前锚点和后锚点组成，前锚点是在土拱肋上的锚固点，后锚点是在边跨拱肋上的锚固点。后锚点和前锚点均为临时锚固点，在完成竖向转体施工后根据具体位置和结构受力情况采用割除和保留处理。对不影响结构美观和安全度的临时构件可以保留在主结构上，或者割除一部分，对割除不方便的或对主结构有影响的临时构件予以保留。前锚点如图 3-2-55 所示。后锚点主要是竖向转体张拉千斤顶处所用的锚固端锚点，锚端采用锚固钢板预埋在边跨拱肋内，完成竖向转体施工张拉后将外露部分割除，其余部分磨光后进行防腐涂装处理。

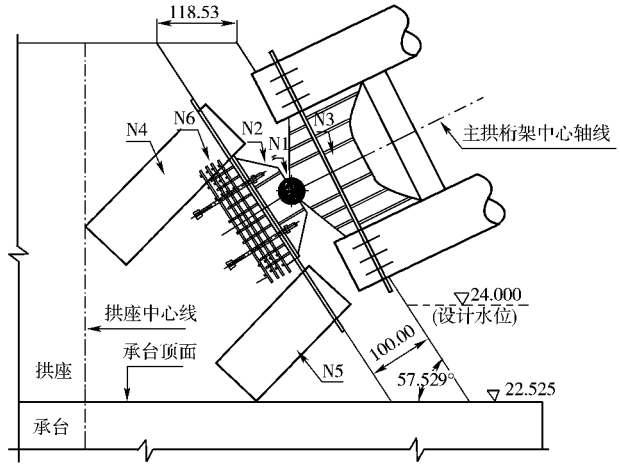


图 3-2-54　转体活动铰结构简图(尺寸单位：cm；高程单位：m)

N1-活动铰转动轴；N2-活动铰支座；N3-桁架活动铰；N4-拱座下弦杆预埋钢管；N5-拱座上弦杆预埋钢管；N6-活动铰支座防裂钢筋网

(6)合龙措施

钢管混凝土拱桥的拱肋在合龙前需要根据实际合龙温度进行拱轴线的调整，临时合龙构件的合理设计，既可以方便拱轴线的调整，又可以充分利用临时结构使之作为永久结构。本桥采用花篮螺杆临时合龙设施。它是一种反向螺纹螺杆，通过旋转螺杆可以使两端内螺杆伸缩，从而调整拱肋轴线，如图 3-2-56 所示。

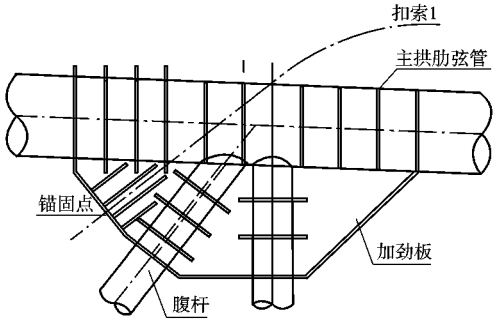


图 3-2-55　前锚点布置

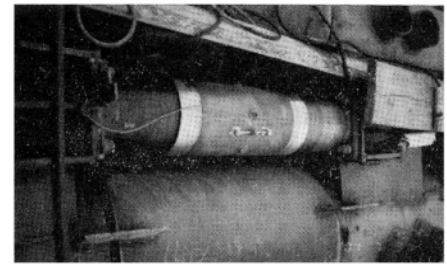


图 3-2-56　花篮螺杆合龙法

5. 在竖转实时控制系统中采用现场总线技术

采用现场总线来构成实时网络系统，使现场的每个节点既具有自主的调节功能，又能迅速地响应系统要求。采用计算机控制液压同步系统是一套比较复杂的机电控制系统，它集成了计算机、传感器、液压方面的最新技术。计算机实时控制系统是这套系统的核心。现场总线构成的实时网络系统，可在竖转过程中通过计算机控制液压同步技术，保证结构安全、快捷地竖转成功，本桥采用该技术保证了施工的准确顺利进行。

第三章 劲性骨架混凝土拱桥的无支架吊装施工

DISANZHANG

第一节　劲性骨架混凝土拱桥简介

一、劲性骨架混凝土拱桥的特点

劲性骨架混凝土拱桥实质上是内填外包式的钢管混凝土结构，其是适应大跨度混凝土拱桥“自架设”应运而生的。其基本原理是利用自重轻、强度、刚度均较大的钢管骨架容易架设，并具有承受后续浇筑混凝土重力的特点，以实现较大的跨越和降低施工费用的目的。其施工程序一般是：劲性骨架安装；灌注管内混凝土；灌注钢管外包混凝土，从而形成钢筋混凝土结构。在这种结构中，先期形成的钢管和钢管混凝土是作为施工的劲性骨架而起作用的，在成桥后，劲性骨架也参与结构受力，但钢管混凝土的结构布置和截面大小一般是由施工受力控制的。

二、劲性骨架混凝土拱桥的施工

1. 钢管劲性骨架的安装

钢管劲性骨架的安装与一般的内填式钢管混凝土拱桥基本一致，根据其跨度、地质、地形、施工机具和工期等可采用转体施工法（如跨度 117.8m 的四川内江新龙坳大桥）、无支架吊装法（跨度 420m 的重庆万县长江大桥和跨度 312m 的广西邕宁邕江大桥）。

2. 钢管内填充混凝土的浇筑

钢管劲性骨架吊装合龙后，利用泵送混凝土在管内填充混凝土，等强。如图 3-3-1 所示。

三、灌注外包混凝土拱圈

劲性骨架混凝土拱桥的外包拱圈以钢管混凝土劲性骨架为依托，利用吊挂模板浇筑，并按照横向分块、纵向分环和分段的原则外包混凝土。劲性骨架单独承担拱圈第一环的混凝土重力，随后各环混凝土的重力由先期浇筑的混凝土环与劲性骨架形成的组合结构共同承担。

这种施工方法的关键是：

（1）大跨度大吨位缆索吊机的设计、安装及操作。

（2）长距离、大落差的混凝土两级泵送和压注工艺。

(3)拱圈混凝土浇筑的“多点平衡法”浇筑程序设计。

(4)劲性骨架安装及拱圈施工过程中的拱轴线控制。

(5)浇筑拱圈外包混凝土期间的结构强度和稳定性分析。

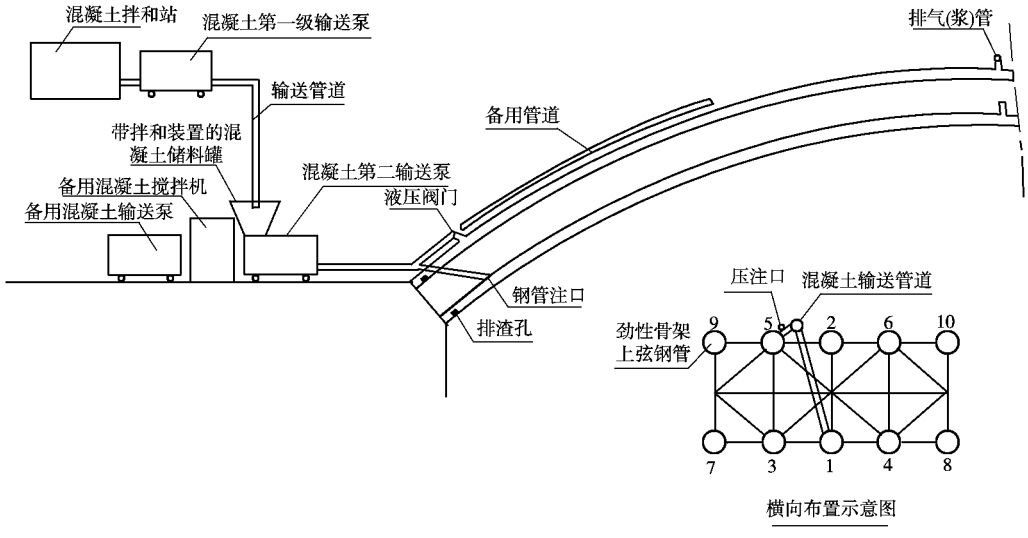


图 3-3-1　万县长江大桥管内混凝土二级泵送示意图

第二节　劲性骨架混凝土拱桥的施工实例

一、概　　述

(1)万县长江公路大桥全长 856.12m,主桥为一孔净跨 420m、矢跨比 1/5 的上承式钢筋混凝土箱形拱桥,钢管劲性骨架成拱,拱上结构为 14 孔 30m 预应力简支 T 梁,引桥为 13 孔 30m 预应力简支 T 形梁桥(南 5 孔、北 8 孔)。桥面连续,宽 24m,设 2×3.75m 行车道和 2×3.0m 人行道从跨中向两侧设 1%双向纵坡,竖曲线半径 5000m,桥面横坡 2%。设计荷载汽-超 20 级,挂车-120 级,人群 3.5kN/m²。主桥下为 1—(2)级航道,设计水位 175.2m(吴淞高程),通航净空 24m×32m,如图 3-3-2 所示。

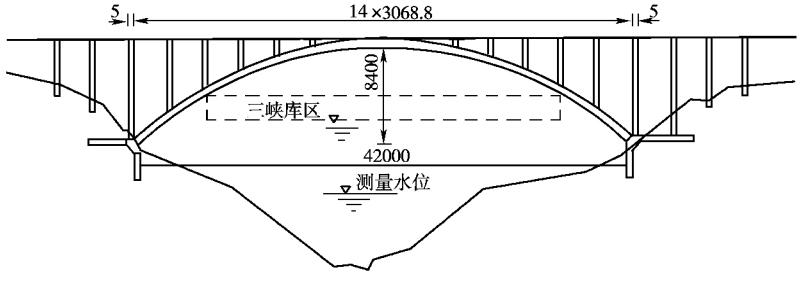


图 3-3-2　万县长江大桥总体布置图(尺寸单位:cm)

(2)主拱圈钢桁架节段在涪陵川东造船厂加工而成,由重庆港务公司分段运至万县黄牛孔桥位吊装悬拼而成拱圈,采用无支架吊装方法,每吊装一段用扣锚索扣定,段间法兰盘栓接,逐一完成全桥 36 段吊装合龙成拱架。

桁架每段外廓尺寸：长 15m(横桥向)、宽 13m(顺桥向)、高 7.6m。钢架由 16Mn 材料的管材和型钢组焊而成，自重为 61.25t。

(3)吊装天线形成：在桥位南北岸交界墩盖梁之上搭设万能杆件龙门架，高 46.5m，宽 22m，两塔间距 435.36m，塔脚为铰支座，其上布置主索及工作天线、索鞍、跑马滑车、吊具、起吊和牵引索；南北岸分别设各种作用的卷扬机、主缆天线锚碇和扣锚梁，天线可实现垂直起吊及沿桥轴向移动，吊重 68t。

附设有工作天线实现人员、材料的运输及吊装辅助工作等。

(4)扣索：扣索分为临时扣索和固定扣索。

临时扣索由钢绳、卷扬机、滑车组成，用于非固定扣索段的临时固定和调整。

固定扣索全桥共 164 根(南北各 82 根)，每岸交界墩到锚梁(设置位于：南岸 0 号、北岸 10 号墩)设 32 根锚索，交界墩到桁架设固定扣索 50 根。

固定扣索及锚索由 36 丝 Φ5 镦头锚和高强钢丝束组成，高强钢丝作临时防锈处理，固定扣索及锚索的固定端分别设于桁架和两岸锚梁之上，张拉端均设于交界墩之上，用油泵、千斤顶及张拉杆实现传递拉力，以锚固扣定桁架(图 3-3-3)。

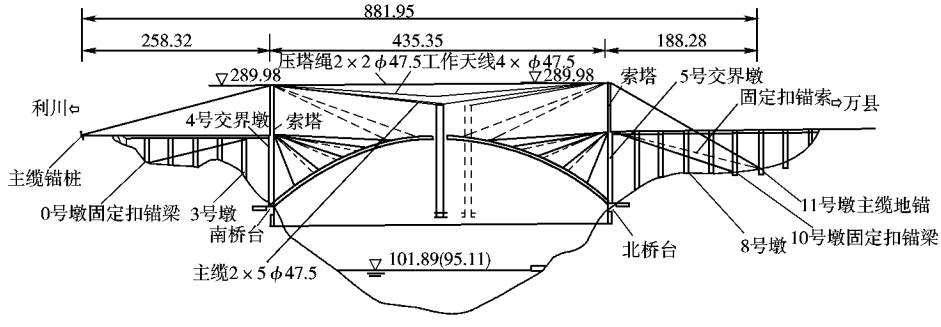


图 3-3-3　万县长江大桥劲性骨架安装扣索布置图(尺寸单位：cm；高程单位：m)

劲性钢骨架吊装程序如下：

桁架运输→由涪陵川东船厂码头运至万县黄牛孔桥轴线下游调头→储放待吊装(验收交接)→向上游运至桥轴线正下方停靠于北岸岸边(同时吊点放下到相应位置)→栓吊点后起吊→起吊至距江面 25m 高处停止→沿桥轴线移动(向南岸或北岸)至安装位置→按设计要求调整桁段两端高程(若是起拱处第一段则直接插入支座管内，南北岸均先后同段号从起拱线开始安装)→使先后两端的法兰盘空相应对中→在桁段上下游弦管对中的法兰盘栓孔中打入一根定位销→安装完所有的螺栓并带上螺母→由桁架上下游最外侧弦管开始向内依次同步地紧固螺母→观测轴线及高程并用吊点调整→安装扣索(临时扣或固定扣索)→在确保高程不变的情况下同时张拉上下游桁架端和松放起吊绳→卸掉吊点→用扣索微调桁架悬臂端高程至设计值→进入下段桁架吊装→全桥完成 36 段吊装一安装嵌填管和抱卡→陆续由下至上取消扣锚系→复测高程→焊接法兰盘(即全桥劲性钢骨架吊装完成)。

二、吊装主要工序操作及要点

1. 桁架装运

(1)标记：桁段工厂编号为 1～36 号。由南至北 1～36 段，每段只标注段号及箭头即可，箭头表示安装方向。

(2)桁段上船。

①面北桁段都必须按固定的船方向,南岸的桁段应使箭头朝向船的左船舷,北岸则相反。

②桁段的重心应放置于运输船的承载中心上(船面上标注中心记号),以避免偏载,应用一定厚度的枕木垫起(或固定于船面的弧形支撑上),使桁段的法兰盘悬空,枕木的大小、数量和旋转的位置既要考虑桁段的稳定平衡,又要兼顾船体结构承载特点(即船的龙骨和内部加劲板等)。

注意:以上第(1)点由加工单位完成;第(2)点由加工、运输两单位共同完成。

2. 运输及停泊待吊

(1)桁架运输途中,主要注意安全,防止浪损及触礁,运输宜缓慢平稳,夜间行驶尤其注意,应选择驾驶经验丰富,深谙由涪陵至万县航道水势情况的人员掌舵。运输途中随时观察支垫、固定缆绳是否松动和桁架是否位移,船上应备有手动葫芦、钢绳、千斤顶和钢钎等以便于及时发现和校正固定。

(2)停泊,船由涪陵李渡行驶至万县黄牛孔桥位下游处较宽阔的江面上调头停泊于北岸江湾内,验收待用。

(3)验收方法:对外形体几何尺寸和主要焊缝复检,直接可用目测和钢卷尺,支垫是否松动,法兰盘是否直接与船面接触而导致变形,法兰盘及栓孔是否平整或有毛刺,可进行校正和打磨,锚梁设置及其角度和锚孔装配尺寸是否符合设计、测点标志和钢管压注口等预埋件,桁段编号及装配方向标志、船上的方向和起吊安装位置是否吻合,不合适时应采取补救措施,并逐一填写工地验收表格,其由施工单位负责。

3. 桁架起吊

(1)准备

①吊装前应提前半月到港监局,按相应的运输规范要求办理江上施工手续,通告沿江主要航运公司,在确认的日期和时间范围进行吊装施工(初定:1995 年 10 月 20 日至 12 月 31 日,每日 11:00～15:00)当日起吊前通知港监船按时到施工点(黄牛孔)进行施工水上警戒及短时禁航,维护江上施工环境和水上船运安全。

②两岸吊装人员和船上人员一起应进行技术交底,同港监人员统一认识,统一行动,规定对讲机频道,对讲机应充足电源,带备用电池,按施工进程分工合作。

运输单位负责把船驶至合适的起吊位置停泊稳当,帮助松开桁段固定钢缆,协助栓好起吊千斤绳(吊点),至到吊起桁段离开船面,船即可将施工单位人员送上岸后开走,返回涪陵载下一段桁架。

南北岸起重人员各自负责上船栓本岸的桁段,操作各种作用的卷扬机,并相互配合实现吊起桁段的起吊和牵引。

吊装指挥,由两岸选派有经验的起重人员负责本岸桁段的吊装指挥,指挥站可根据施工进程选择过江缆车、交界墩或船上等合适的位置。

③对吊装天线和设备的检查,安排好观测点、仪器及人员,对各种电器及设备进行检查、空载运行,将吊装时间通告电力公司以确保供电,电工就位,备好各种易损电器如开关、插头和保险电缆等,对地锚和塔架设好测量标志和测站,吊具滑车及钢索走线是否顺畅。人员的配备数量及技术熟练程度是否合理,分工是否明确,掌握天气预报信息,选择晴天少雾施工。

(2)桁段起吊

①吊点应提前放下至离水面约 10m 处,距北岸黄牛孔岩壁约 10m,让出江面南岸侧主道,

继续过船。

②载着桁段的船向上航行至桥轴线北岸侧吊点正下方，用缆索与起吊趸船固定。

③放下并调整吊点高度位置栓好吊点千斤绳。

④卸掉船上的桁段固定钢绳。

注意：③、④点可同步进行。

⑤分别调整吊点高度，使4个吊点高度一致，两岸同时开动起吊卷扬机（各4台）收绳，使桁架平稳起吊，起吊过程中应注意观察桁段是否平衡（水平）并调整。

⑥当桁段吊离开船面一定高度时，船即可离去。

⑦当桁段达到一定高度（或接近安装高度）时，停止起吊，两岸开动牵引卷扬机（每岸各2台），一岸收绳，另一岸则放绳。

注意：收放索速度应一致，牵引过程中注意观察桁架上下游端应保持平行移动，松边绳不能有拉力，每岸的卷扬机应用配电板集中操作控制，既便于操作又节省人力。

4. 法兰盘连接

（1）南北岸起拱处第一段固端（即指拱座方向）无法兰盘，仅调整高程及轴线，用手动葫芦，上下游侧同时牵引，使下弦管同时插入下弦支座管，用葫芦拉紧固定，防止跳出，再用吊点调整悬端（背离拱座方向）至设计高程值。

（2）放下临时扣索，用千斤绳栓好临时扣点于桁架悬端。开动上下游的扣索卷扬机收紧扣索，同时松放起吊吊点，这一过程中确保桁架悬端上下游弦管的测量控制点的设计高程基本不变，最后取消起吊吊点，完全由临时扣索固定桁架，并将扣绳用索卡锁定。

注意：上下游扣索的张紧力求相同。

（3）对孔定位：每岸从第二段桁架开始，桁段固端均要装法兰盘螺栓，用起吊索使固端和悬端的上下游测点高程基本达到设计值时，用手动葫芦使被吊段的固端和已安装段的悬端拉拢，调整法兰盘对接，在上下游侧的法兰盘上各找一孔用销钉打入定位。

（4）安装螺栓：对整个法兰盘螺栓都上好螺栓和螺母后再上下左右对称地旋紧螺母。

5. 安装扣索

（1）扣索分为临时扣索和固定扣索，临时扣索由钢绳滑车组成，由卷扬机张拉传力，力的大小取决于桁架的高程控制；固定扣索由高强钢丝和镦头锚组成，由张拉千斤顶、张拉杆、液压油泵传力拉紧或放松固定扣索，张拉力最初根据设计提供，最终取决于高程，即由高程控制拉力。

（2）每岸起拱第一、二段桁架安装时，必须分别设临时扣索，第三段桁架开始设固定扣索，以后每间隔两段设一次固定扣索（即第六、九、十二段等），固定扣后的第一段桁架，临时扣索可省去，第二段必须设置临时扣索。

（3）临时扣索：当法兰盘螺栓均检查安装完毕无漏装，螺母紧固，即可安装临时扣索，考虑预抬悬端高度一定值，主要考虑钢索的塑性拉长，特别是新钢绳作扣索时。

（4）固定扣索

①扣索运输及过江：根据经验和本桥扣索钢丝束较细特点，可采用人工肩抬上桥，每隔4～7m一人即可；用工作天线横江设数个吊点，依次逐步拉过江。固定扣索为36Φ5高强钢丝镦头拉索在南岸引道专门的制索场预制而成。

②（岸侧的）锚索安装：两岸的锚索可提前全部制作，并全部安装，由张拉杆系锚定，暂不拉力（锚索每岸共32根），待张拉扣索时，与同号扣锚索同步张拉。

③(河侧的)固定扣索安装:当桁段法兰盘螺栓安装的同时,可同步进行挂扣索工作;扣索的站拉端设于交界墩锚梁上,由张拉杆和卷扬机牵引钢索拉过锚孔,用螺母和螺纹衬套锚固,安时张拉端外露 80cm 以上,以便安装 YC60 千斤顶;扣索的固定端是设于桁架锚梁之上,由吊点托住索身向锚梁(扣点)牵引运送,用手动葫芦拉引张拉端镦头锚穿过锚梁孔,戴上螺母,即这样逐一地把同索号的每根扣索安装完成。

④张拉:按照对称于桥轴线,由桥外侧向桥轴线,同索号的扣索和锚索同时张拉的原则。张拉的吨位由设计提供,最后以高程控制(即全部张拉到吨位后的调整阶段),张拉的同时松下起吊索,整个过程桁架悬端处于上下来回波动之中,但最终该段控制点高程控制在设计值。

注意:

每索的最大张拉吨位按设计索力控制(列表说明)。

张拉时扣锚索同进进行,均匀缓慢张拉至设计值,以保证交界墩观测值为零位移(左右不超过 2cm。

张拉和松吊点过程应确保控制点高程基本不变。

最终张拉力以桁架的高程控制。

调索时,应尽可能在每日早晨或晚上(即气温 15～20℃)进行高程观测并调索力。

全桥吊装过程中高程和扣锚索力张拉及控制程序遵照设计提供数据。

6. 卸去吊点

张拉完成,桁段高程达到设计值起吊索也完全松弛,即可拆去吊点千斤索。

在第 1 号扣索张拉完毕,且高程符合设计时,应把拱脚弦管与支座管全焊接,使拱脚由铰接变固结。

7. 全拱架高程调整

当各岸的 18 段桁架吊完后,进行全面的高程测量和轴线观测,从偏离设计值较大的测点调整索力,比设计高程值大的就放松相应段的扣索力(过大时要适当放松同号的锚力);反之则张拉加大索力,使桁架上的每一高程控制点和轴线控制在允许误差之内。这项工作应在早晨或晚上进行。

8. 合龙

(1)安装嵌填管及抱卡,在温度 15～20℃(一般在早晚)时,当通过观测控制点均符合设计要求时,即进行合龙工作,精确测量两岸桁段悬端每管端面间距(设计值 20cm),并编号作为记录,根据所测数据精确下料加工 ϕ402 管子(嵌填管),在同样温度时,根据编号对应地嵌入相应的跨中桁架悬端接缝中,再按设计要求装上抱卡及螺栓并拧紧。对抱卡与弦管施焊。

(2)体系转换(取消扣锚系统)。

由拱脚开始(由下至上)对称地用千斤顶、油泵送去同号的扣锚索(仍要确保交界墩位移为零)。

要点:

两岸同时同步地由上至下、对称于跨中和轴线进行松扣松锚,用工作天线吊运拆除扣锚索。

全桥控制点松扣索后应符合设计高程变化规律。

交界墩盖梁的位移始终保持为零。

9. 全桥法兰盘施焊

两岸对称地(以跨中和桥轴线对称)同时同步陆续完成全桥拱架的法兰盘对接焊缝焊接,

确保设计焊缝厚度。

10. 高程复测

全桥法兰盘施焊结束且冷却至常温后，选择晴天的早晨或晚上(15～20℃)时，对全桥高程进行观测，若完全符合设计值即宣告全桥桁段吊装顺利结束，反之则报请设计及监理单位采取补救措施。

三、吊 装 测 量

(1)交界墩的测量：主要观测交界墩沿桥轴线的位移，在交界墩上游或下游一定距离的位置设一固定观测站，可同时观测交界墩盖梁上下游边缘平行于桥轴线伸出的水平观测尺。

(2)吊装天线塔顶的位移量：吊装前可在塔顶上下游端部悬挂大的铅垂球，并在塔脚铰支座处设置平行于桥轴线的固定水平尺，以观测塔顶在吊装过程中顺桥轴的位移量。

(3)吊装天线主地锚和锚索锚梁测量：主要观测地锚和锚梁在受载过程中可能顺桥轴向的位移。在沿地锚的上游或下游一定距离处设一固定测站，观测地锚混凝土结构上的平行于轴线的水平尺，特别是在试调和吊装初期对天线地锚的观测和吊装合龙前对扣锚梁的位移值观测。

(4)桁架的观测：主要是对吊装阶段测量，为调索力提供高程依据。

①轴线测量：可在每段桁架的悬端中片骨架的上弦管上用红漆标出轴线记号，测站可随着吊装的进展选择在拱座和交界墩盖梁的桥轴线上，或把轴线作向上游或下游平移到视线畅通的位置(后视点可选择在江对岸的交界墩盖梁上)。

②高程测量：全桥拱圈桁架，每岸上游或下游各有六个控制点，共 24 个控制点，设计坐标编号：26、56、86、116、146、176，考虑可在沿岸上下游距桥一定距离(约 200m)设置观测站，采用全站仪、人工跑点方法，直接读出测点高程。若用水平仪测量则要根据测点高程在两岸相应的地方设置测站，在测点处悬挂铅垂尺，读出高程值。

另外，可采用较长钢卷尺挂大垂球及相对固定的精密水准仪作高程的辅助(补充)测量及无扣索段骨架的控制测量。

拟采用 2 台全站仪进行高程观测，人员乘工作吊笼上劲性骨架上立站标(反光镜)。

③拱圈加载至桥面以后的两岸主拱座的受力观测，即向两岸侧向的推移量和下沉值(在吊装拱圈骨架之后进行的测量工作)。

四、外包拱圈混凝土灌注

该桥外包混凝土的数量约 11054m^3，为保证劲性钢管混凝土结构的安全，采取均衡浇筑法施工。横向的浇筑顺序为“先中箱、后边箱、先底板、后腹板、再顶板”的顺序，如图 3-3-4 所示。

其横向分块的浇筑都在纵向形成一环，经过龄期的间隔，先后参与受力，逐步增大拱圈的断面及刚度，直至形成整体拱圈。

其全桥每环纵向的混凝土浇筑顺序如图 3-3-5 所示，共分六个工作面对称同步浇筑。按照分析计算，六个工作面的浇筑可使混凝土劲性骨架挠度下沉均匀，基本上无上下反复现象，骨架上下弦杆及混凝土断面始终处于受压状态，应力变化均匀上升，可以保证拱圈施工过程中强度、稳定性的安全性要求。

六个工作面浇筑时，拱圈底板分为 13 个工作段，除拱座承托区工作段全宽浇筑 3.5m 外，其余工作段浇筑长度均为 6.43m；腹板混凝土工作面分为 6 个浇筑工作段，每个工作段浇筑长

度为 13m；顶板混凝土每个工作面分为 12 个浇筑工作段，每个工作段浇筑长度为 6.55m。各工作段间允许存在一个浇筑工作段的时间差。

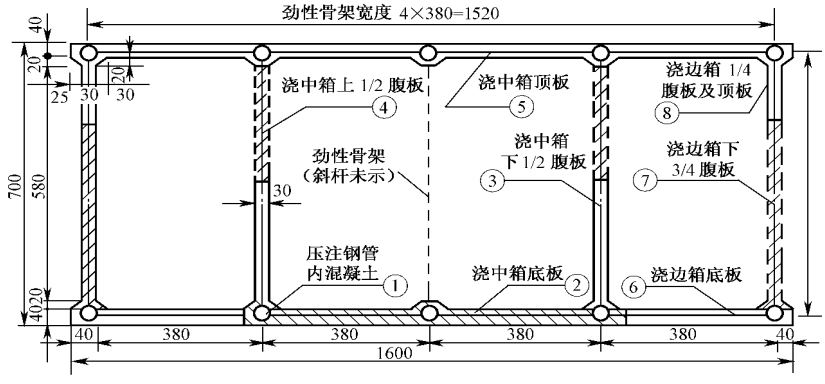


图 3-3-4　万县长江大桥外包混凝土拱圈灌注顺序（尺寸单位：cm）

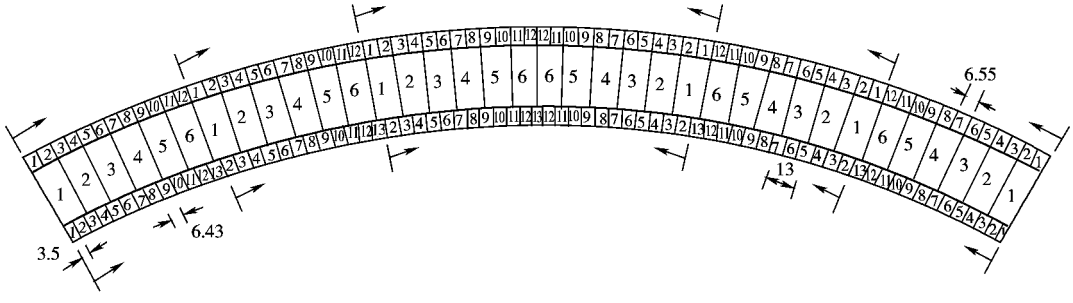


图 3-3-5　万县长江大桥拱圈混凝土纵向浇筑顺序图（尺寸单位：m）

五、施 工 安 全

（1）施工人员上桁架，必须栓安全带、戴安全帽，严格按安全施工规程做到安全施工和操作。

（2）法兰盘螺栓、螺母应用麻袋运输送至桁架，现用现取出。

（3）扳手及定位销、榔头等工具应用绳栓系于工作人员身上，避免不慎失手落入江中或危及航道安全。

（4）吊装施工阶段，两岸应增调起重人员，并进行反复技术交底，让大家心中有数。

（5）两岸的对讲机频率应统一规定，分开使用。

（6）吊装施工应选择天晴雾少、视线良好气候，严禁恶劣气候强行吊装。

（7）每吊装一段桁架，应在其上下游边缘的上弦管处设置轻型有护栏的安全便道，以利于施工人员及测量人员上行施工和测量。

（8）卷扬机操作应设置集中控制和过载保护装置，以便于控制操作。

（9）卷扬机操作人员应选派经验丰富、责任心强的起重工担任。

（10）各种卷扬机应尽量可能地布置在视线良好的地方，即操作人员可看见相应的跑车和吊点。

第四章 钢箱拱桥施工

DISIZHANG

第一节 概 述

一、卢浦大桥主桥概况

上海卢浦大桥主桥为钢箱拱桥，主跨550m，采用空间提篮中承式拱梁组合体系，为目前世界上同类桥型中跨度最大的拱桥。主桥建成双向六车道，并设两条观光人行道。主桥设计荷载为汽车-20级、挂车-100，局部结构按汽-超20、挂-120验算。人群荷载4kN/m^2，全桥满布人群荷载2.4kN/m^2，如图3-4-1所示。

该桥主桥于2000年10月18日开工，2002年10月7日主拱合龙，2003年2月7日桥面贯通，2003年6月28日建成通车。

二、施 工 特 点

1. 集普通钢拱桥、斜拉桥和悬索桥的施工方法之大成

(1)中跨系梁的施工，则采用拱上吊机进行类似于悬索桥的垂直提升技术进行施工。

(2)边跨三角区，采用了履带吊浮吊进行有支架施工，类似于一般拱桥的支架施工。

(3)中跨拱肋制造安装工艺，特别是斜拉扣索施工具有斜拉桥特点。

2. 施工难度增大

施工过程中需进行多次结构体系转换，结构受力变化很大。对结构的内力、高程的调整次数多、精度要求高，这就给施工监控增加了很大的难度。

三、施 工 方 案

1. 桥面以下部分构件的施工

(1)钢拱座安装，钢拱座由150t吊车将其吊装在预先安装好的胎架上进行安装焊。

(2)钢拱肋施工，陆上部分采用支架法施工，水上部分采用悬臂法施工。

(3)桥面施工，岸上采用2台300t吊机双机抬吊，河跨部分采用1000t浮吊进行安装。

(4)锚碇以及端横梁施工，用350t吊机分段吊装就位，在现场组焊成整体。

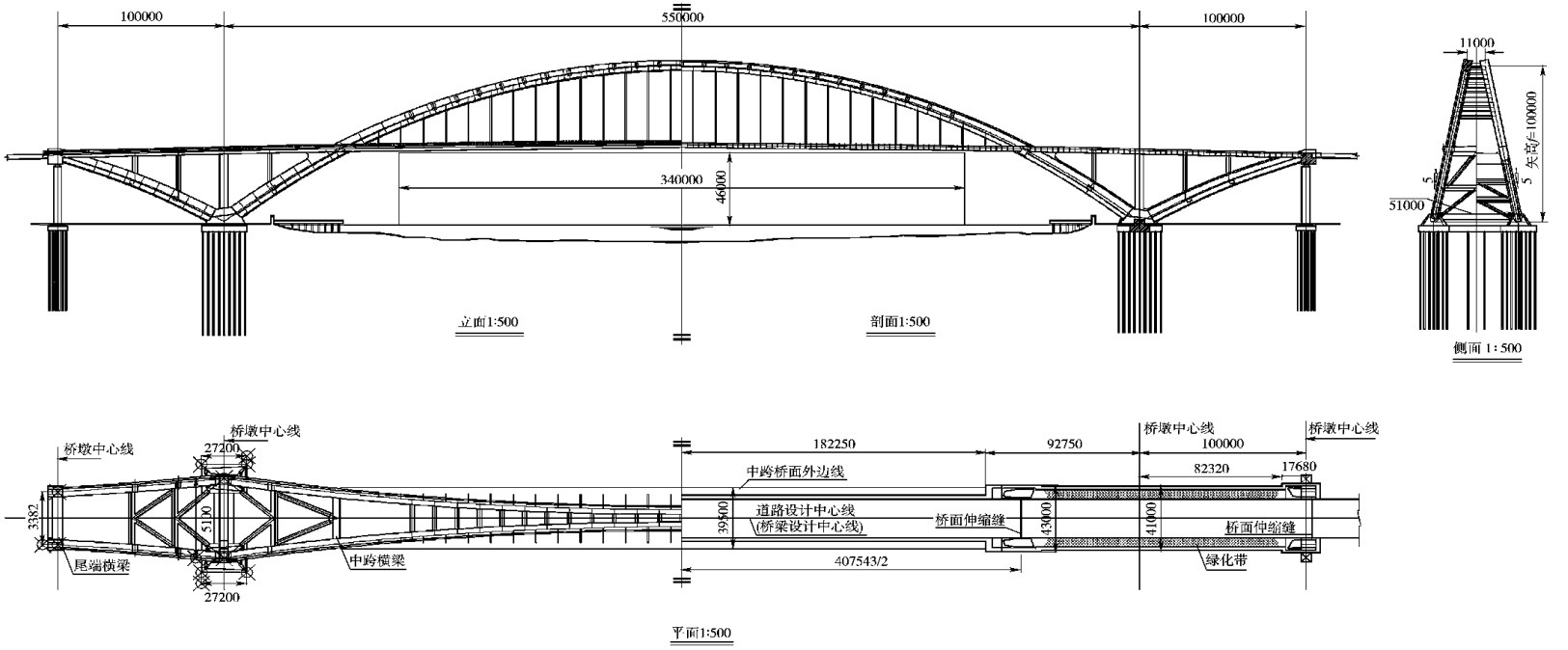


图 3-4-1　**卢浦大桥主桥布置图(尺寸单位**:mm)

(5)立柱以及斜撑施工,采用 300t 吊机吊装。

2. 主跨拱肋施工

(1)临时索塔施工,采用 320t·m 塔吊分节吊装就位焊接方法施工。

(2)临时索施工,配合拱肋节段的挂索、张拉、锚固、调索、控制等,与一般拱桥扣索的施工基本相同。

(3)拱上吊机安装,拱上吊机采用国外进口的专门为主跨拱肋安装设计并提供提升的设备,采用 1000t 浮吊整体吊装。

(4)主跨拱肋标准段施工,采用拱上吊机安装。

(5)合龙段吊装,合龙段施工吊装同样采用拱上吊机。

四、主跨桥面系施工

(1)水平索施工,采用地面放索,桥面以上索采用跨中架设辅助猫道过江。

(2)吊杆施工,跨中较长的吊杆从水上直接提升,两侧较短的则采用猫道安装。

(3)桥面施工,桥面加劲梁由 5000t 驳船运至吊装位置,再利用改造的拱上吊机吊装。

第二节　施工技术及工艺

一、"三角区"施工

"三角区"施工泛指桥面以下部分的构件的施工,主要包括:钢拱座安装;斜撑及大、小立柱安装;边跨拱肋安装;锚碇、端横梁安装;河跨拱肋安装、河跨桥面安装、岸跨桥面施工。其施工如图 3-4-2 所示,其工艺流程如图 3-4-3 所示。

图 3-4-2　三角区施工示意图

1. 钢拱座安装

钢拱座为全桥受力的核心点,整个钢拱座重约 290t,根据加工及安装工艺要求,拱座分 6 块制作,单个构件最大质量为 61.4t,外形尺寸 5400×9100×15800(mm^3)。在厂内进行预拼装,验收合格后,运到现场由 150t 吊车将其安装在预先安装好的胎架上进行安装焊接。

2. 钢拱肋施工

"三角区"拱肋边跨 0～7 号段、GL1、GL2,以及河跨 0～7 号段,主要采用了以下两种方法:陆地上的部分采用支架法施工,水上部分采用悬臂法施工。

(1)支架法施工

主桥边跨 0～7 号段、GL1、GL2,河跨 0～2 号段的施工,主要应用采用 300t 或 350t 大型吊机吊装,钢排架支承的方法安装。这部分构件最重 130t。钢排架采用 ϕ900 和 ϕ609 两种钢管,B0～B6、Z0～Z2 为 ϕ609 钢管,B7、GL1、GL2 采用 ϕ900 钢管。每道支撑由 2 根钢管组成,2 根钢管沿横桥向布置,钢管的顶部设一根口对口布置 2[40 的横梁。根据拱肋的分段质量及安装高度,1～7 号段考虑采用 300t 吊机单机安装。GL1、GL2 采用 350t 吊机吊。

(2)悬臂法施工

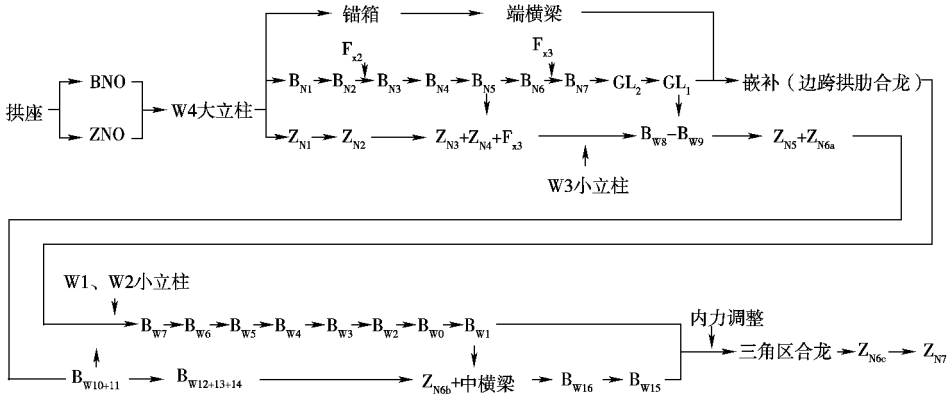


图 3-4-3 “三角区”安装流程图

依据吊装工艺以及浮吊的起吊能力，将拱肋分为 Z3＋Z4、Z5＋Z6a、Z6b＋中横梁、Z6c、Z7 组合段（Z6b＋中横梁最重达 800 余吨），再按先后顺序吊装。根据整体吊装要求，Z3＋Z4 拱肋增设一道临时风撑、Z5＋Z6a 段增设二道临时风撑、Z6c 段增设一道临时风撑、Z7 段增设一道临时风撑，临时风撑在拱肋拼装时一起安装验收。应用 1000t 浮吊吊装到位后，先安装连接拉杆，后安装固定在大立柱上的临时索和部分接缝定位板，同时测量安装节段的坐标并用千斤顶、龙门夹具配合浮吊微调。

临时连接和临时索安装到位后，开始焊接并安装下一节段。

3. “三角区”桥面施工

“三角区”桥面包括 B0～B7、B8～B16 共 17 个节段。

（1）岸跨部分施工

岸跨部分桥面标准 B1～B7 长 9m、宽 41m、高 3.023m，自重 126～142t，特殊段 B0 段长约 20m、宽 27m、高 3.023m，自重 177t。考虑运输的方便，顺桥向分为两段，采用两台 300t 吊机双机抬吊。吊装顺序是：BW0-1→BW0-2→BW7→BW6→BW5→BW4→BW3→BW2→BW1（合龙段）。施工流程是：排架基础施工→排架搭设→焊接平台布置→双机抬吊就位→测量、焊接→验收→下一段施工→合龙段施工。

（2）河跨部分施工

河跨部分包括 B8～B16，共 9 个节段，单体最重 350t（9 号段），顺桥向长度都是 9m，考虑到施工实际，B10～B11、B12～B14 是在内厂焊接成整体后吊装的。桥面系梁全部采用 1000t 浮吊进行安装。考虑到浮吊的工作能力，浦西 8、9 号段及浦东 8、9 号以及 10～11 号须滑移就位，其余均用浮吊一次吊装到位。

河跨部分施工的关键是支架的搭设以及滑移系统的安装。支架立柱采用 ϕ900×20 的钢管，滑移轨道梁采用桁架形式，由现场预制桁架梁然后组合而成。轨道梁与支架立柱固定连接。8 号节段用 4 台台车滑移，其余均用上下游 6 台台车滑移。安装流程是：驳船定位→浮吊定位→加载起驳→提升、吊装就位；其余节段不需要剩余过程：吊装节段就位在台车上→构件滑移→落架就位。

4. 锚碇以及端横梁施工

锚碇是水平索和临时斜拉索的锚固段，每段重约 600t，两段间通过 350t 钢横梁连接。由

于单节质量过大，施工时这部分构件分为12个部件，其中端横梁单件质量不大于110t，锚箱最大为125t，应用350t吊机分段吊装就位，在现场组焊成整体。

5. 立柱以及斜撑施工

卢浦大桥竖向支撑系统由E1(W1)、E2(W2)、E3(W3)、E4(W4)及两根斜撑组成。E4(W4)最重，在施工中分为133t和70t两部分用300t吊机吊装。

二、主跨拱肋施工

1. 临时索塔施工

临时索塔为全钢结构，每只索塔有2根塔柱、4根横梁、4根斜撑以及14对拉索锚固钢梁等构件组成。每只索塔设二只钢基座，高1m，与9号系梁固接。每个塔柱由4根750×750(mm^2)的焊接箱形通过H形钢连接而成，顺桥向中心线的尺寸为6.8m，横桥向的中心线尺寸为4m，塔柱总高度128m。每根横梁由4根H形钢通过槽钢连接成空间桁架形式，横梁高4m、宽6.8m、长约28.5m。每道斜撑均由2榀斜撑组成X形，每榀斜撑由2根750×750(mm^2)的焊接箱形钢杆以槽钢连接成双幅组合结构，长约40m。

图3-4-4 临时索塔

临时索塔安装采用320t·m塔吊分节吊装就位焊接方法施工，临时索塔如图3-4-4所示。

2. 临时索施工

临时索按照半桥中跨分为14个节点，计14对、56根斜拉索，主跨上下游侧各两排索。临时索采用OVM200型平行钢绞线拉索体系，锚具内灌注专用防腐油脂，索体为带黑色PE护套的高强低松弛钢绞线，强度等级为1860MPa。主要内容包括：钢绞线斜拉索体系的制作，配合拱肋节段的挂索、张拉、锚固、调索、控制等。

3. 拱上吊机安装

采用国外进口的专门为主跨拱肋安装设计并提供提升的设备，主要分为桁架部分、提升系统、行走系统。其中桁架部分重约100t，行走、提升系统重约20t，外形尺寸44×3×4(m^3)，安装高度为73.7m(于Z6c及Z7号拱肋顶面)，最大起吊能力400t，最大提升高度110m，最大提升速度36m/h。采用1000t浮吊整体吊装。

中跨拱肋焊接使用的悬挂平台，利用卷扬机进行整体提升，并用索悬挂在拱上吊机上。

4. 主跨拱肋标准段施工

主跨拱肋部分包括Z8～Z21号段，共27个吊装节段，除21号外，其余节段的水平投影长为13.5m，最重节段近400t，最大安装高度(黄浦江水面以上)约110m。拱肋的安装工艺流程是：拱上吊机前移锚固→临时索调整、测量→构件水上就位→安装索具→调整钢绞线→千斤顶加载、构件起吊→调整纵横位置→拱肋临时就位、测量→调整、测量复核、定位焊→构件环缝焊接→安装临时索并张拉→拱上吊机脱钩。拱肋标准段吊装如图3-4-5所示。

图3-4-5 拱肋标准段吊装

5. 合龙段施工吊装

合龙段施工吊装同标准段，综合各种施工条件，决定合龙段分为上、下游拱肋以及风撑三段进行吊装。拟采用一段栓接、一段焊接的连接方法。

拱肋的安装工艺流程是：拱上吊机前移锚固→临时索调整、测量→构件水上就位→安装索具→调整钢绞线→千斤顶加载、构件起吊→调整纵横位置→拱肋临时就位、测量→调整、测量复核、定位焊→构件环缝焊接→安装临时索并张拉→拱上吊机脱钩。

图 3-4-6　拱肋合龙施工

合龙段施工吊装同标准段，综合各种施工条件，决定合龙段分为上、下游拱肋以及风撑三段进行吊装。拟采用一段栓接、一段焊接的连接方法。合龙施工如图 3-4-6 所示。

三、主跨桥面系施工

主跨桥面系施工包括：桥面以上水平索安装、吊杆安装、桥面安装、桥面以下水平索安装，以及在桥面吊装过程中的水平索张拉和临时索拆除的相互体系转换。由于卢浦大桥主桥是一座拱座无推力的中承式系杆拱桥，桥面系施工应遵循拱座水平推力平衡的原则，确保把拱座水平位移控制在设计允许的范围内，由此确定桥面系整体施工顺序。在拱肋合龙后，先安装张拉部分水平索，再吊装桥面，并逐步拆除临时索。水平索安装张拉、桥面加劲梁吊装和临时索拆除同步交叉进行。

1. 水平索施工

桥面上游、下游水平索各 8 根，每根长约 760m、重约 130t，采用地面放索（桥面以上索采用跨中架设辅助猫道过江）。安装时，先用吊机将一段抽出，经过锚墩处导向架吊至桥面；再用卷扬机拖至另一段锚箱，放索时，水平索放置在托轮上；最后用千斤顶牵引直到带上永久螺母。

桥面以上水平索同桥面施工交错进行，桥面以下水平索则在桥面安装合龙后安装。

2. 吊杆施工

主跨桥面由 28 对 112 根吊杆悬挂在钢拱肋上，Z0～Z6 每段桥面各 8 根吊杆，Z7 段桥面 4 根吊杆。张拉端设在主拱肋中板上，锚固端设在主跨桥面上。吊杆长 9～51m 不等，重 0.5～1.2t。吊杆安装分为水上提升和猫道提升两种，跨中较长的吊杆从水上直接提升，两侧较短的则采用猫道安装。

图 3-4-7　桥面吊装

3. 桥面施工

全桥分为 15 块，每块大小约为 39.2×27×3（m^3），重约 450t，并通过 28 对吊杆悬挂在拱圈上。桥面加劲梁利用改造的拱上吊机吊装。改造后的吊机长约 16.5m，在拱上行走到位后锚固，桥面加劲梁由 5000t 驳船运至吊装位置，再用四台千斤顶提升到与永久吊杆相连。桥面梁提升速度为24～36m/h，吊装作业时需要局部封航。桥面吊装如图 3-4-7 所示。

四、临时工程的拆除

该桥主桥施工采用了许多临时工程，如大量的钢排架、临时索塔、临时斜拉索等。附属工程的用钢量达 16000 余吨，不仅施工的工程量很大，而且拆除的工程量、施工风险也很大。

五、现场焊接质量控制

该桥采用的是可焊接细晶粒正火 S355N 结构钢，钢板厚度从 10～100mm，而且主桥采用全焊接的连接方式，对于焊接的工艺、焊工和探伤人员的技艺及素质、焊接的环境，特别是现场焊接的防风、防雨措施要求很高。焊接质量是日常大桥正常运营最重要的保障。因此，有必要专门编制焊接作业指导书，进行全过程的质量控制。

六、上部结构施工监控

1. 上部结构安装施工监控的总体考虑

(1)上部结构安装施工监控工作的优劣成败将直接影响结构的安全储备和长期的运营条件，对于整个工程能否如期完成至关重要。

(2)针对卢浦大桥主桥结构安装施工过程及其结构行为特点，选定恰当的阶段控制目标、主要的控制内容和控制方法。

(3)区别于其他桥梁的安装施工过程的特点。

①“三角区”的施工安装过程中，需要进行大立柱的内力调整及主拱肋的内力调整。

②“三角区”以外的主拱肋的安装施工过程中，施工临时索塔、拉索均是临时结构，设计安全度较小，临时拉索在主拱肋合龙后，部分水平索安装张拉后，将逐渐拆除，这对主拱肋、主墩基础的受力有较大影响。

③在吊装拱肋以下部分桥面加劲梁的过程中，需要适时安装张拉水平索，还要穿插拆除临时斜拉索。

2. 上部结构安装施工监控实施的主要内容

(1)监控原则与措施

①通过周密、详细的计算、分析和比较，验证控制目标，拟定优化的、切实可行的安装施工顺序。

②研究分析各类参数的偏差或误差对结构安全、稳定性和线形的影响。

③制定合理的安装质量控制要求、技术要求。

④制定相应的监测技术要求。

⑤施工全过程跟踪监控与调整(主墩、拱肋、加劲梁、索塔、拉索的内力和线形)。

(2)施工全过程跟踪监控与调整

①大立柱的内力调整与监控。

②“三角区”支架反力的监控。

③“三角区”主拱肋的内力调整与监控。

④“三角区”拱肋、桥面加劲梁预拱度的设置。

⑤拱肋安装的监控(钢拱肋、施工临时索塔、拉索等)。

⑥施工过程结构的整体抗倾覆稳定性的分析与控制。

⑦拱肋合龙前内力、高程的调整。

⑧水平索张拉、吊杆安装、临时拉索拆除和桥面加劲梁安装的监控与调整。

⑨主墩水平反力、位移的监控与调整。

(3)现场施工控制过程

①“三角区”施工

因为水平索的张拉,会使得大立柱顶端产生顺桥向指向跨中的水平位移,于是在大立柱底产生很大的弯矩。因此,在大立柱安装后、“三角区”边跨合龙前,采用了预偏大立柱的方案。

由于水平索的张拉以及其他一些原因,会在中拱脚产生巨大的负弯矩。因此,在边跨“三角区”合龙前,采用了预拉中拱脚的方案。

②悬臂拼装施工

在悬臂拼装施工过程中,利用拱肋结构本身的承载能力,适当降低拱轴线高程,以减小临时拉索的控制索力。在全部拱肋节段和临时拉索安装完成后,通过整体索力调整把拱肋轴线调高。

参 考 文 献

[1] 交通部第一公路工程局. 桥涵(下册). 北京:人民交通出版社,2000.

[2] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥设计与施工. 北京:人民交通出版社,1999.

[3] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥实例集(一). 北京:人民交通出版社,2002.

[4] 本书编委会. 中国桥梁. 上海:同济大学出版社、建筑与城市出版社有限公司,1993.

[5] 中国公路学会桥梁与结构工程学会. 中国公路学会桥梁与结构工程学会 2002 年全国桥梁学术会议论文集. 北京:人民交通出版社,2002.

[6] 倪顺龙,郭光松. 中承式钢管混凝土系杆拱桥. 北京:人民交通出版社,2006.

[7] 中国公路学会桥梁与结构工程学会. 中国公路学会桥梁与结构工程学会 2003 年全国桥梁学术会议论文集. 北京:人民交通出版社,2003.

[8] 中国公路学会桥梁与结构工程学会. 中国公路学会桥梁与结构工程学会 2004 年全国桥梁学术会议论文集. 北京:人民交通出版社,2004.

[9] 中国公路学会桥梁与结构工程学会. 中国公路学会桥梁与结构工程学会 2005 年全国桥梁学术会议论文集. 北京:人民交通出版社,2005.

第一章 大跨度梁桥概述

DIYIZHANG

梁式桥种类很多，也是桥梁中最常用的桥型，其跨越能力为 20～300m 范围内。常用的梁式桥按结构体系分为简支梁、悬臂梁、连续梁、T 形刚构、连续刚构等；按截面形式分为 T 形梁、箱形梁（或槽型梁）、桁架梁等；按材料分为混凝土梁和钢梁。

对于大跨度梁式桥而言，主要有箱形连续梁和连续刚构，以及钢桁架梁。

第一节 大跨度预应力混凝土连续梁概述

一、连续箱形梁桥

箱形截面能适应各种使用条件，特别适合于预应力混凝土连续梁桥、变宽度桥。因为嵌固在箱梁上的悬臂板，其长度可以较大幅度变化，并且腹板间距也能放大；箱梁有较大的抗扭刚度，因此，箱梁能在独柱支墩上建成弯斜桥；箱梁容许有最大细长度；应力值 σ_{g+p} 较低，重心轴不偏一边，同 T 形梁相比徐变变形较小。

箱梁截面有单箱单室、单箱双室（或多室），早期为矩形箱，逐渐发展成斜腰板的梯形箱。

箱梁桥可以是变高度，也可以是等高度。从美观上看，有较大主孔和边孔的三跨箱梁桥，用变高度箱梁是较美观的；多跨桥（三跨以上）用等高箱梁具有较好的外观效果。

预应力混凝土连续箱梁桥具有桥面接缝少、梁高小、刚度大、整体性强，温度应力小、外形美观、便于养护等特点，是大跨度梁式桥的常用桥型。

20 世纪 70 年代我国开始修建连续箱梁桥，到目前为止我国已建成了多座连续箱梁桥，如一联长度 1340m 的杭州钱塘江第二大桥（公路桥）等，如图 4-1-1 所示。

连续箱梁桥的施工方法多种多样，只能因时因地，根据安全经济、保证质量、降低造价、缩短工期等方面因素综合考虑选择。一般常用的方法有：立支架就地现浇、预制拼装（可以整孔、分段串联）、悬臂浇筑、顶推、用滑模逐跨现浇施工等。

预应力钢束采用钢绞线，可以分段或连续配束，一般采用大吨位群锚。为了减轻箱梁自重，可以采用体外预应力钢束。

由于连续箱梁在构造、施工和使用上的优点，近年来建成预应力混凝土连续箱梁桥较多。其发展趋势为：减轻结构自重，采用高强度等级的混凝土 C40～C60；随着建筑材料和预应力技

术发展，其跨径增大，葡萄牙已建成 250m 的连续箱梁桥，超过这一跨径也不太经济。大跨径连续箱梁要采用大吨位支座，如南京第二长江大桥北汊桥 165m 变截面连续箱梁，盆式橡胶支座吨位达 6500kN。

二、T 形刚构桥

这种结构体系由于其后期下挠较大和形成不甚平顺等问题，存在致命弱点。从 20 世纪 60 年代起到 80 年代初，我国公路桥梁修建了几座 T 形刚构桥，如著名的重庆长江大桥（如图 4-1-2所示）等，80 年代以后，由于运营过程中出现的种种问题，这种桥型基本不再修建了，本书不再赘述。

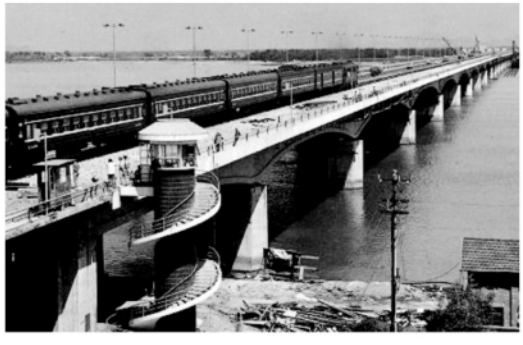


图 4-1-1　杭州钱塘江第二大桥

图 4-1-2　重庆长江大桥

三、连续刚构桥

预应力混凝土连续刚构桥一般采用变截面箱梁。我国公路桥梁在 100m 以上多采用预应力混凝土连续刚构桥。连续刚构可以多跨相连，也可以将边跨松开，采用支座，形成刚构一连续梁体系。一联内无缝，改善了行车条件；梁、墩固结，不设支座；合理选择梁与墩的刚度，可以减小梁跨中弯矩，从而可以减小梁的建筑高度。所以，连续刚构保持了 T 形刚构和连续梁的优点。

连续刚构桥适合于大跨径、高墩。高墩采用柔性薄壁，如同摆柱，对主梁嵌固作用减小，梁的受力接近于连续梁。柔性墩需要考虑主梁纵向变形和转动的影响以及墩身偏压柱的稳定性；墩壁较厚，则作为刚性墩连续梁，如同框架，桥墩要承受较大弯矩，而且基础也要承受固端弯矩。

由于连续刚构受力和使用上的特点，在设计大跨径预应力混凝土桥时，优先考虑这种桥形。当然，桥墩较矮时，这种桥型受到限制。

近年来，我国公路上修建了几座著名的预应力混凝土连续刚构桥，如广东洛溪大桥，主孔 180m（图 4-1-3）；湖北黄石长江大桥（图 4-1-4），主孔 3×245m；广东虎门大桥副航道桥，主孔 270m（图 4-1-5），为目前世界同类桥中最大跨径刚构桥之一。

我国的预应力混凝土连续刚构桥，几乎都采用悬臂浇筑法施工。一般采用 C50～C60 高标号混凝土和大吨位预应力钢束。

由于连续刚构跨径加大，自重随着加大，若能采用轻质高强混凝土材料，其跨径有望达

300m 左右。否则，300m 以上跨径的预应力混凝土连续刚构一般来说是不经济的，在技术上也是不大合理的。

图 4-1-3　广东洛溪大桥

图 4-1-4　湖北黄石长江大桥

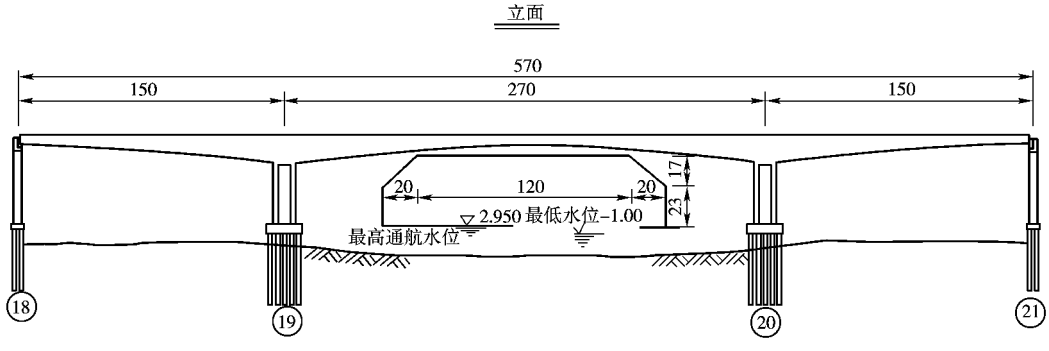


图 4-1-5　虎门大桥副航道桥桥型布置图(尺寸单位：m；高程单位：m)

四、钢 桁 梁 桥

钢桁梁桥具有轻质高强、施工快速的优点，曾经是跨越大江大河最有竞争力的桥型，如我国的武汉公铁两用长江大桥、南京公铁两用长江大桥、金沙江铁路简支钢桁梁桥等。

钢桥在国内主要用于铁路桥或公路铁路两用桥。公路钢桥以山东省北镇黄河公路桥(1972 年)为最大，最大跨度 112m，是一座铆接连续钢桁梁，如图 4-1-6 所示。1980 年建成的广东省马房北江公路桥，已采用先进的栓焊箱梁和正交异性钢桥面板设计，如图 4-1-7 所示。公路铁路两用的武汉长江大桥(1957 年)采用主跨 128m 的钢连续桁架梁，3 号钢铆接连接，是中国现代钢桥建设的第一里程碑，如图 4-1-8 所示。南京长江大桥(1968 年)采用了较好的 16Mnq 钢材，主跨增大为 160m 的铆接连续钢桁架梁，从材料、设计到施工均依靠本国力量建成，如图4-1-9所示。九江长江大桥(1992 年)采用了更好的国产 15MnVNq 钢材，最大板厚达 56mm；栓焊连接，主跨达 216m，系以柔拱加劲的连续钢桁架梁；在钢梁安装方法上，也从单层吊索架发展为双层吊索架安装，如图 4-1-10 所示。

三堆子金沙江桥位于四川省渡口市的成昆铁路线上，是国内跨度最大的单线铁路简支钢桁梁桥，跨度达 192m，全长 390.4m。主桁采用平行弦菱形桁架，桁高 24m，桁宽 10m；主梁与横梁采用 16Mnq 低合金钢，其余杆件采用 A3q 钢。采用两岸悬拼跨中合龙的架设方法。于 1969 年 10 月竣工，如图 4-1-11 所示。

图 4-1-6　山东省北镇黄河公路桥

图 4-1-7　广东省马房北江公路桥

图 4-1-8　武汉长江大桥

图 4-1-9　南京长江大桥

图 4-1-10　九江长江大桥

图 4-1-11　成昆铁路三堆子金沙江桥

第二节　大跨度梁桥的结构构造

一、桥　　墩

1. 桥墩的类型

桥墩可归纳为重力式和轻型两类。重力式桥墩具有靠静载来平衡外力而保持其稳定的特点。从受力上看，可承受较大的水平力，墩身多为小偏压。它在铁路桥和公路桥的梁桥上使用较普遍。轻型桥墩具有对地基的压力小，自身刚度小，受力后允许在一定范围内发生弹性变形的特点。它的结构种类很多，适用性广泛，在许多公路桥和城市桥、立交桥与高架桥中普遍使用。

(1)重力式墩

重力式墩的截面形式多为整体式实体截面，具有较大的静荷，常用的实体截面形式如图4-1-12所示。整体式实体截面的桥墩整体性好，施工方便，一般采用圬工砌体或由混凝土浇筑，但这类桥墩材料用量多，体型较大。从减少水流阻水的要求考虑，以圆端形及菱形截面较好。圆形截面对各方向的水流阻水导流情况相同，适应于潮汐河流或流向不定的桥位。

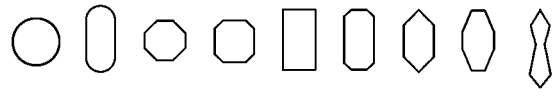


图 4-1-12　重力式桥墩的截面形式

(2)轻型墩

轻型墩有薄壁截面、空心截面或薄壁双体截面的桥墩等。轻型墩的柔度除与截面刚度有关外，还与桥墩的高度有关。薄壁截面的轻型墩有一字型、I 字型等形状。空心截面类型很多，图 4-1-13 表示常用的空心桥墩截面形式。轻型墩圬工体积小，节省材料，结构轻巧，同时也降低了对地基的要求。轻型墩大多由钢筋混凝土或预应力混凝土结构制作。空心墩的顶端要设置实体过渡段，使上部结构的集中荷载能均匀地分布到桥墩截面上，集中力较大的支座，在支座位置的混凝土内，要设置钢筋网进行局部加强。

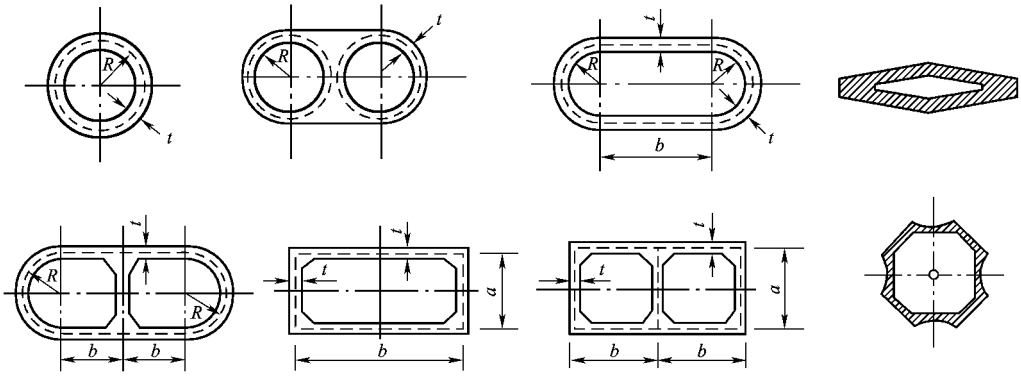


图 4-1-13　空心桥墩截面形式

2. 桥墩的横向构造

桥墩的横向构造要根据荷载的大小、上部结构的形式、地基承载能力和桥墩所处位置的条件选择对于悬臂施工的桥梁，上部结构多采用箱梁。

上部结构为箱形截面的桥墩横向布置如图 4-1-14 所示。图 4-1-14a)为在箱梁下设置单一支座的独柱式墩。这样，箱梁底板要承受局部弯曲应力，适用于小跨径窄桥，或在支承处箱内设置横隔梁；图 4-1-14b)变宽度墩身，上大下小，但在两侧各加一个三角锥体，因此导流性好，又能增加立体感；图 4-1-14e)为并列式桥墩，可选用等宽度和桥墩构造；图 4-1-14f)双箱单室上部结构采用分离柱式和悬臂墩帽的桥墩构造。对于多箱或宽桥的桥墩横向布置，可参考图4-1-14选择。在高桥墩中，采用分离式墩身，可根据受力情况增加横向联系。当上部结构为分离式箱梁截面时，桥墩及其基础在一般情况下也分开设置，减小梁间的相互影响，如图 4-1-15 所示。分离式墩身可采用薄壁墩、空心墩、I 形墩、H 形墩等。

二、桥　　台

桥台分为重力式桥台和轻型桥台两大类。重力式桥台多用于铁路桥和公路桥的梁桥与拱

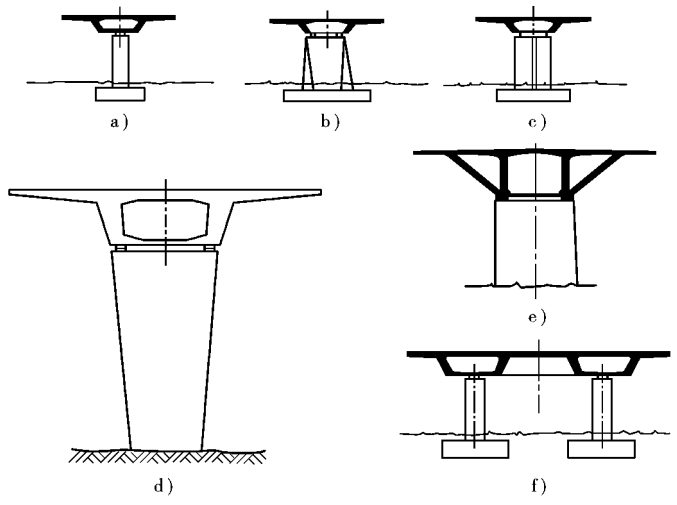


图 4-1-14　箱形上部结构的桥墩横向布置

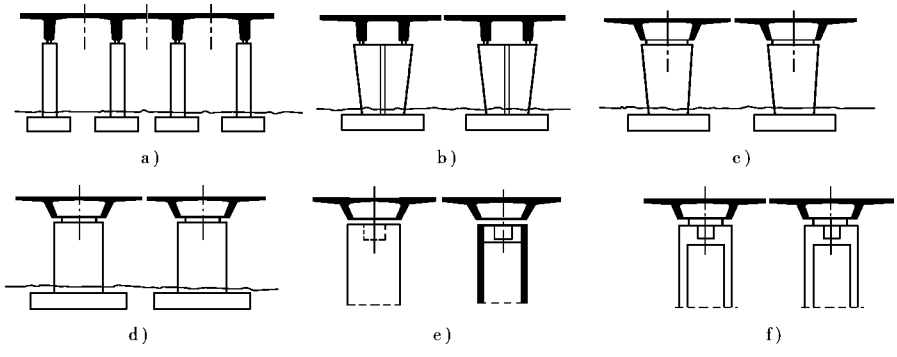


图 4-1-15　分离式桥墩的横向布置图

桥上。一般来说，重力式桥台的优点是结构简单，施工方便，可以就地取材，用石料或混凝土砌筑等。缺点是静载大，对地基要求高。大跨度梁桥多采用重力式 U 形桥台，如图 4-1-16 所示，U 形桥台构造简单，基础底承压面大，应力较小，但圬工体积大，桥台内的填土容易积水，结冰后冻胀，使桥台结构产生裂缝。U 形桥台适用于填土高度 8～10m 的较大跨径桥梁，要求桥台中间填料，并用渗水较好的土夯填，做好台背排水。

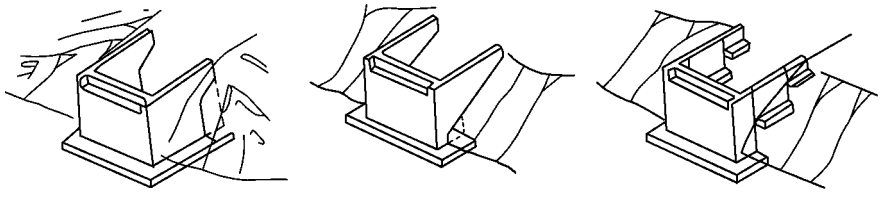


图 4-1-16　重力式桥台形式——U 形桥台

三、梁桥的上部结构

1. 梁桥的分跨与布置

大跨度的连续梁桥、连续刚构桥主跨的大小选择，多跨的分布与划分，跨径之间的配合，梁横截面的设计、形状与尺寸的拟定等，都对桥梁建成后的适用、经济、合理和美观起重要作用。

如图 4-1-17 所示，连续梁和连续刚构内力分布较合理，只在中间支点附近有一段负弯矩高峰，若考虑支承反力的局部作用，该负弯矩的峰值还将降低，而跨中正弯矩则比简支梁降低许多。

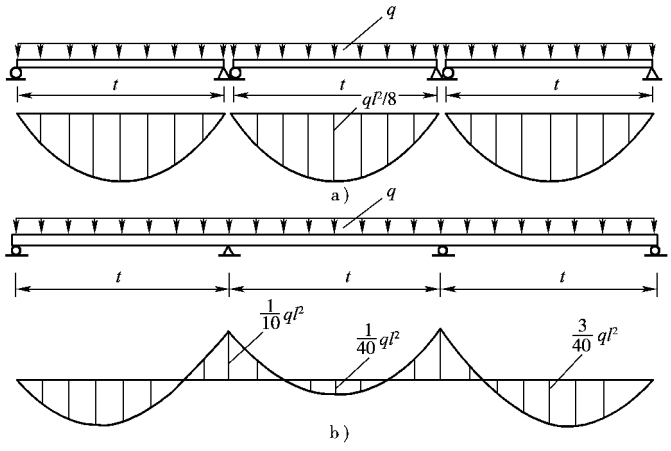


图 4-1-17　梁桥恒载弯矩比较图

a)简支梁；b)连续梁

如图 4-1-18 所示，对于连续刚构桥，由于梁墩固结，则可进一步降低跨中弯矩，实现更大的跨越。

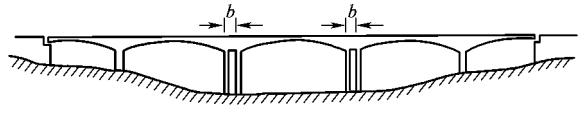


图 4-1-18　连续刚构布置图

应当指出的是：对于超静定结构，由于温度影响、混凝土收缩徐变作用的计算不易准确、钢筋松弛和基础不均匀沉陷等会在结构内部引起很难准确计算的附加应力，加之施工工艺控制的不到位，这类连续结构常常容易产生开裂、下挠过大等问题，对此应当引起重视。

大跨度公路连续梁和连续刚构一般都采用变高度梁，即二次抛物线、立方抛物线等立面线形。支点梁高与跨径的比值一般取 $H/L=(1/16\sim1/25)$，跨中梁高 $h=(1/2\sim1/3)H$；对于铁路桥，支点梁高与跨径的比值为 $H/L=(1/12\sim1/22)$，跨中梁高 $h=(1/5\sim4/5)H$。对于悬臂施工的大跨径桥梁，施工时恒载内力较大，设计时梁高宜用较大值。较经济的选择支点梁高与跨径的比为 $H/L=1/17$，为施工方便和箱梁内模的立模与抽模考虑，连续梁跨中梁高应大于 1.6m。

变化支点与跨中梁高有以下几个优点：节省材料，由于材料性能发挥较好而节约了混凝土和预应力筋；减小了剪应力；美观。

对于大跨径悬臂施工的桥梁，常用的横截面类型为箱形梁。使用箱形梁的主要优点：在悬臂施工方法下，恒载弯矩对桥墩附近梁底部产生压应力，箱梁的底板可承受压应力，所以使用箱形截面，材料利用效率较高，还有利于承受上翼缘预应力筋张拉阶段所产生的拉应力；箱梁结构弹性稳定性好，有较大的抗扭刚度；适用于宽桥，当用单箱单室时可不设横隔板；适用于弯、坡、斜等异形桥梁，有利于布置预应力钢束。

(1)箱梁的室和箱

使箱中的室最少化，因每个室都需内模的厚腹板以抵抗剪力是较经济的，腹板间距以5～7m为宜。然而，提供少数目厚腹板也使预应力筋的布置和锚固变得容易，并且可以改进混凝土的浇筑条件。

箱和室的数目及腹板多少取决于桥梁的宽度，如表 4-1-1 所示。

桥宽与箱室关系表　　表 4-1-1

桥宽 B(m)	单箱单室	双室	分离双箱(四腹板)	分离三箱	分车道两双箱
$B\leqslant 15$	√				
$15<B\leqslant 20$		√			
$18\leqslant B\leqslant 25$			√		
$22\leqslant B\leqslant 35$				√	

(2)箱梁腹板厚度

按照一般的设计经验，箱梁腹板厚度一般为 200～600mm。

当梁高为 7m 时，其计算经验公式为 $\delta\geqslant\frac{h}{22}+80+\phi$(mm)。

(3)箱梁腹板间距与顶板的关系

顶板厚 $t_T=(L/36+100)$mm。一般来说，箱梁顶板与腹板间距的关系如表 4-1-2 所示。

箱梁顶板与腹板间距的关系　　表 4-1-2

腹板间距 L(m)	2.5	3	3～4.5	4.5～7.5	7.5～10
顶板厚度 t_T(mm)	160	175	200	250	300

(4)箱梁腹板间距与底板厚的关系

底板厚度主要取决于底部设置预应力筋的需要，最小厚度是预应力束直径的 2.5 倍，一般底板最小厚度在 200～250 mm 之间。在接近墩部时，因纵向弯矩作用，底板承受压应力，底板厚度应加大。

2. 梁体预应力的布置

(1)预应力钢筋的类型

梁体中布置预应力钢筋的目的是为了抵抗弯矩或拉应力的，因此，应该根据梁的弯矩包络图来配置。对于大跨度连续结构，由于悬臂施工等工况，使得预应力的布置不只考虑结构在运营状态下的受力弯矩包络图，还需考虑施工情况下的弯矩包络图。梁体预应力钢筋的布置可分为以下几种：

①直线束和曲线束。

②体内束和体外束。

③有粘结束和无粘结束。

④纵向束、横向束和竖向筋。

⑤悬臂预应力束和连续预应力束。

(2)纵向预应力钢束的布置

大跨度梁桥的纵向预应力束一般分为悬臂预应力束和连续预应力束。悬臂束主要是为了抵抗悬臂施工引起的负弯矩，悬臂束的平均长度一般为 $0.52L$。使用连续预应力束，也叫后期束，主要是在悬臂施工完成后，结构受力体系由悬臂结构合龙转换为连续结构，需抵抗合龙后的跨中附近截面的正弯矩以及内力重分布。另外，还需考虑承受的荷载为：桥面等二期恒载，活荷载，温度变化引起的荷载，悬臂预应力和梁的荷载的重分布等，连续束的长度一般为

$(0.35\sim0.5)L$。

①悬臂施工时的纵向悬臂预应力钢束布置

悬臂梁的悬臂预应力束的设计应与悬臂施工时所产生的负弯矩相配合，每一束悬臂预筋的长度应结合每一现浇段或拼装节段的长短到墩顶支承点的距离而定。在每一节段施工完后就会穿束张拉并锚固一批预应力筋，从而使预应力束的总数量从墩顶开始不断减少，如图 4-1-19 所示。

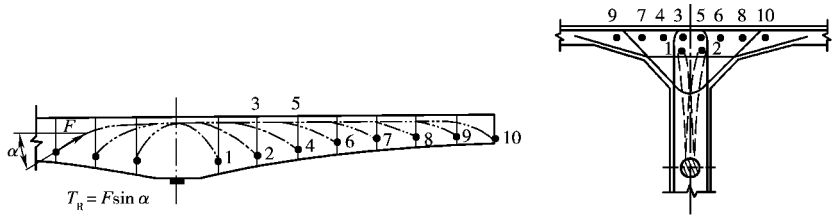


图 4-1-19　悬臂预应力钢束图

悬臂法施工的桥梁，所用的纵向预筋为高强度钢丝或钢绞线，解决了布束拥挤的问题。预应力束的强度不必太高，然而在每一个腹板中悬臂预应力束的数量，必须至少应等于每一节段预加应力时所需钢束的数量。尤其应注意的是，超强束应注意保证混凝土在锚固区的承压强度，并且有效地分布预加力产生的集中应力。过度的锚固集中应力会使锚固梁体发生局部乃至全断面破坏。通常用于悬臂梁中纵向预应力钢束的受力为 1000～5000kN。悬臂梁预应力束有两种可能的布置方式：一种为倾斜束，主要在腹板内倾斜布置，如图 4-1-20 所示；另一种为平直束，即上顶板内的水平预应力钢束，如图 4-1-21 所示。

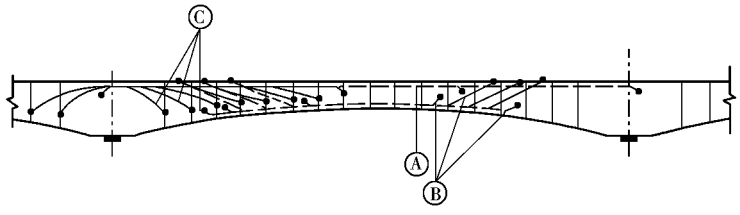


图 4-1-20　倾斜预应力钢束

A-顶板束；B-底板束；C-顶板倾斜束

倾斜的预应力束：

传统的悬臂梁预应力束的布置是让顶板束弯曲或倾斜进入腹板内，以产生预应力来减少外荷载所产生的剪力。钢束应先有平弯再有竖弯才能满足进入腹板倾斜的需要。一般这些弯向或斜向腹板束都必须在各个腹板节段内锚固。

腹板应有足够厚度以承受集中的锚固力。如果腹板太薄，或如果混凝土强度太低，可能会出现沿预应力束线方向的开裂。为避免混凝土开裂，可以用主动钢筋网和竖向预应力筋并借助于应力箍来锚固。锚固板还可放置在锯齿板上或腹板混凝土截面的表面。

在梁高较低的梁段，倾斜的预应力束的预应力竖向分力不能平衡竖剪力时，还必须由被动的箍筋来承受。如果倾斜预应力束锚固在底板附近的梗腋上，则上述锚固区开裂的缺点就可以克服。

对于分段预制的梁，使钢束的立面布置标准化很重要。一些特殊预应力束必须在横向结点并被锚固在标准位置，以便使节段的端模板统一并简化，以利于节段梁的预制施工。

如果梁是变高度的，锚固位置和钢束的横截面位置将可保持为常数值。一旦这两个参数已被决定，钢束的倾斜角是变化的并且最大地接近支承点，这可使相应的最大剪力面的剪应力得以减少。

如果梁是等高度的，悬臂梁的预应力束的立面布置是简单的，从一个节段到另一个节段布置都是相同的。如果都锚固在腹板上的话，预应力束的使用可以是统一的。

水平预应力直钢束：

预应力钢束是沿着顶板水平布置并锚固在梗肋处，如上图4-1-21所示。水平预应力直束可减少预应力的摩擦损失，并且穿束方便。一般比同长度弯曲束可节约预应力钢束费用10%左右。另外，由于无纵筋管道通过腹板，也可改善高薄腹板混凝土的灌筑条件。因水平预应力束与传统的斜弯钢束比较不能减小剪应力，因此，必须配置竖向预应力筋以承受剪应力。这样水平预应力筋束的设计和构造仅由弯拉应力决定，而剪力强度由竖向预应力钢筋提供。

图4-1-21　水平预应力直钢束

②整体化连续预应力钢束的线形设计

整体化连续预应力钢束的设计必须保证在两个悬臂之间形成连续整体的梁，并且承受由恒载传递与悬臂梁负弯矩相反的最大正弯矩。这种连续束又分为梁底部连续束B型和顶部连续束T型，如图4-1-22。

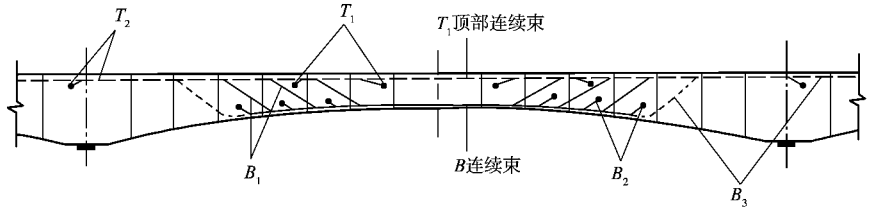


图4-1-22　连续预应力钢束图

梁底部B连续束布置：

如图4-1-22所示，梁底部连续束B_1型是向上弯起直到腹板与顶板交界的梗肋处锚固。如果悬臂预应力束有弯斜束的话，两者之间会有交叉，腹板中倾斜预应力束则较多，这样腹板中只需布置小直径的普通箍筋。另一方面，必须考虑上顶板是否会有水渗漏至束的管道里，因此必须特别注意灌浆和密封。

另一种在梁底部的连续束是B_2型，直接锚固在底板的锯齿板上，这些束的线形相似于上顶板水平束线形。

还有一种在梁底部的连续索是B_3型，向上弯起后再在梁的支承附近以直线越过到达另一跨度内。

所有这三种位于底板上的连续束，在底板上时其线形都经过底板截面的中心线。对于变高度梁因在连续等跨中段变为纵向曲线形，将会使曲线预应力束产生向梁外弯曲向心径向力。这一向外的弯曲向心径向力的作用，是在叠加荷载作用下在较低的底板上产生最大压力N'，这较低箱梁底板上将承受附加的竖向应力0.03MPa，这时钢束力为1800kN，在0.20m空间区段内并且产生的曲率半径大约为300m。

如果预应力钢束是位于腹板里面锚固，则必须增加箍筋以承受此力。另外，由于由预应力钢束管道定位钢筋之间的蛇形变化与上浮，预应力钢束张拉时会引起局部向外的弯曲向心径向拉力，致使局部混凝土受拉而开裂或崩出，如图 4-1-23 所示。这一缺陷可用刚性固定管道代替柔性管道的方法来避免。当集中多束预应力钢束锚固在同一断面底板的锯齿板上时，将会出现高度应力集中现象，加上在锚固区局部压应力的分布不均匀等原因，会在该断面底板附近出现拉应力裂缝(图 4-1-24)。因此，集中多束预应力钢束锚固在同一断面现象应尽量避免和减少。从理论和受力分析，主要是由集中锚固多束预应力筋张拉所产生的拉应力效应大于由底板上压区混凝土被动普通钢筋所能产生的抗压应力效应。这可以通过在锚固区半截面处对预应力钢束的拉力大小计算来评价。如果为预制分段施工，一般情况为开裂出现在节点处，并且此处未布置加强横向钢筋。

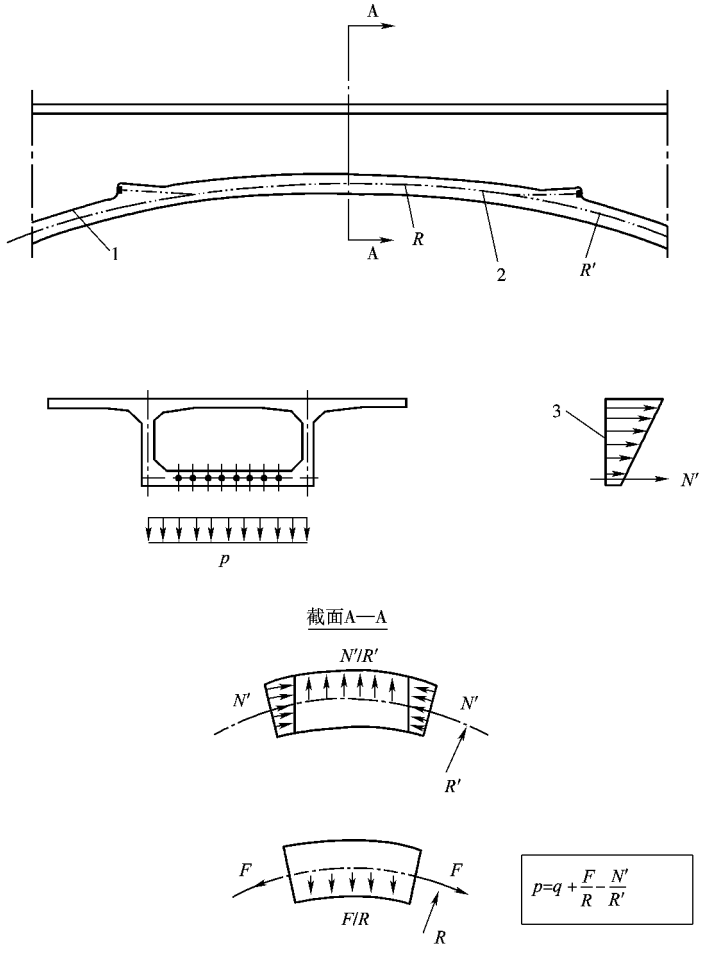


图 4-1-23　底板弯曲束的向心径向力示意图
1-底板中心线；2-底板预应力弯曲束；3-截面应力图

梁顶部连续 T 束的布置：

梁顶部连续预应力钢束的设计，主要考虑三个方面的问题：一是下底板预应力张拉阶段避免箱梁顶板出现拉应力并开裂；二是承担箱梁在腹板和上顶板相交处梗胁的锚固节点的局部

集中应力和剪力滞作用；三是将顶板预应力钢束锚固在可扩大支承面的横隔板或横隔梁处。这些顶部连续钢束一般可布置锚固在上顶板内或分段施工后顶板特设的锯齿板内。

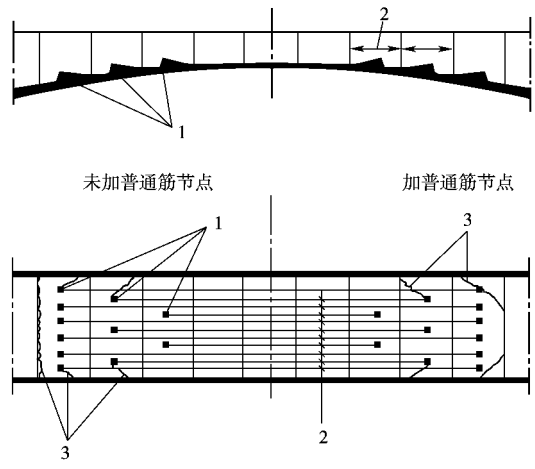


图 4-1-24　集中多束预应力筋锚固示意图

1-锚固点；2-集中布置的预应力钢束；3-裂缝

连续集中预应力钢束的布置：

连续预应力钢束所承担的超静定结构的弯矩，一般占支点截面最大负弯矩的 6%～8%，主要原因是在长大跨桥梁中，连续集中预应力钢束布置的数量相对于悬臂钢束要少得多。

(3)横向预应力钢束的布置

箱梁桥的顶板横向跨度较大时或其他形式截面梁的横隔梁，常施加横向预应力，以帮助承受横桥向的弯拉应力，并加强桥梁的横向联系。横向预应力钢束可采用直线配束，也可采用曲线配束，据受力需要及构造情况而定。一般情况下，桥梁顶板结构中横向预应力钢束的数量为 5～7kg/m^2。每立方米混凝土内普通钢筋：箱梁顶板横向施加预应力的为 60～80kg；箱梁顶板为普通钢筋混凝土结构时，为 80～100kg。

横向预应力钢束可用平行钢丝束，也可用钢绞线。如使用了 BM15-4 预应力体系，沿桥纵向间距 1m 布置，单端交替张拉，张拉控制为 720kN。我国自行研制有夹片式扁锚，管道为扁圆形，垫板为长方形。采用扁锚，减小了顶板厚度，实现了按内力需要来布设预应力钢束，如图 4-1-25所示。

(4)竖向预应力筋的布置

为抵抗和减少竖向剪力的作用，应配置竖向预应力钢束来提高梁截面的抗剪能力。我国常用的竖向预应力筋多为 Φ32～Φ45mm 的预应力高强精轧螺纹粗钢筋，配 YGM 轧丝锚具锚固，也有用预应力钢丝束和钢绞线作为竖向预应力筋，在预留孔道内按后张法工艺张拉施工。

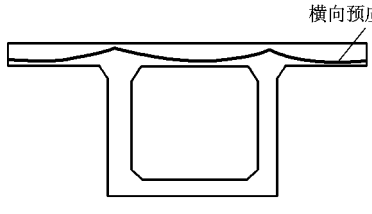


图 4-1-25　横向预应力钢束布置示意图

(5)体外预应力钢束的布置

体外预应力钢束布置将钢束设置在主梁截面的箱内或梁外，利用横隔板、支架及转向块等结构固定位置和方向，以施加预应力，帮助或改善桥梁结构的受力。体外力筋早在 1928 年已在欧洲开始使用，近年来，在日、美等国的桥梁中又有了长足的发展。使用于波形或折形钢腹板与混凝土顶底板相结合的预应力箱形梁可减轻梁体自重。使用体外预力筋的优点是不削弱主梁截面，不需预留孔道，抽换钢束方便，预制节段悬拼施工的桥梁可用于接缝结合，施工周期加快。

体外预应力束既可适用于做永久预应力束，也可作为施工临时束，或作为旧桥加固的预应力束使用。体外预应力钢束可用平行钢丝束也可用钢绞线，可直线布束，如图 4-1-26 所示，也可曲线布束。体外筋的外面一般需有防护防腐蚀措施。常用的防护套是在钢束外加聚乙烯套管，在横隔梁、支架、肋式或块式转向块处预埋镀锌钢管。并为减少横隔梁和转向块处的应力集中，在力筋弯起点附近加设普通构造钢筋网和矩形或环向箍筋等，进行局部加强和扩散力，

横隔板式和肋式转向块的优点是可形成抵抗预应力筋张拉分力的受压支柱，这一受压支柱从管道一直形成到桥面。而块式转向块的优点是仅设置在箱底板根部，体积小，结构附加质量小，但承载能力较小。

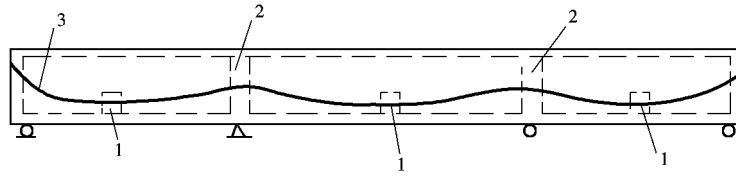


图 4-1-26　体外预应力束示意图

1-转向块；2-横隔梁；3-预应力钢索

第二章 大跨度预应力混凝土梁桥的悬臂灌注施工

DIERZHANG

本章主要介绍连续梁及连续刚构桥的施工与设计，包括挂篮悬臂施工法、移动悬吊模架悬臂施工法、滑移支架悬臂施工法等。

第一节　移动式挂篮悬臂灌注施工

用挂篮悬臂灌注施工的主要工作内容包括：在墩顶浇筑起步梁段（0 号块）；在起步梁段上拼装悬灌挂篮并依次分段悬灌梁段；分阶段及总体合龙。

一、施工挂篮的结构构造及设计

挂篮是一个能沿梁顶滑动或滚动的承重构架，其锚固悬挂在已施工的前端梁段上，在挂篮上可进行下一梁段的模板、钢筋、管道的安设，混凝土灌注和预应力张拉，灌浆诸作业。完成一个节段的循环后，挂篮即可前移并固定，进行下一节段的悬灌，如此循环直至悬臂灌注完成。

1. 挂篮的分类特点及其适用性

（1）挂篮分类

挂篮按构造形式可分为桁架式（包括平弦无平衡重式、菱形、弓弦式等）、斜拉式（包括三角斜拉式和预应力斜拉式）、型钢式及混合式四种；挂篮按抗倾覆平衡方式可分为压重式、锚固式和半压重半锚固式三种；挂篮按走行方法可分为一次走行到位和两次走行到位两种；而按其移动方式可分为滚动式、滑动式和组合式三种。

几种主要挂篮的结构如图 4-2-1～图 4-2-7 所示。

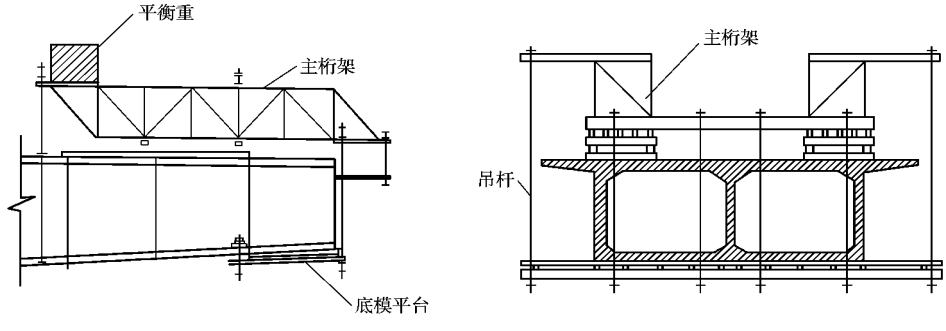


图 4-2-1　平行桁架式挂篮

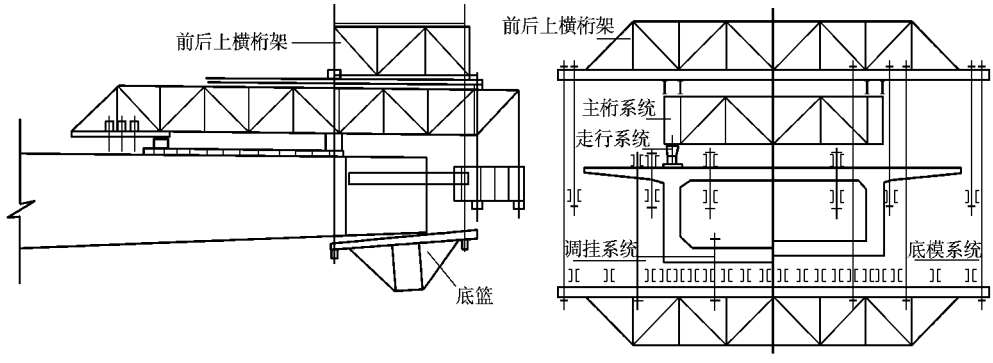


图 4-2-2　**平弦无平衡重挂篮**

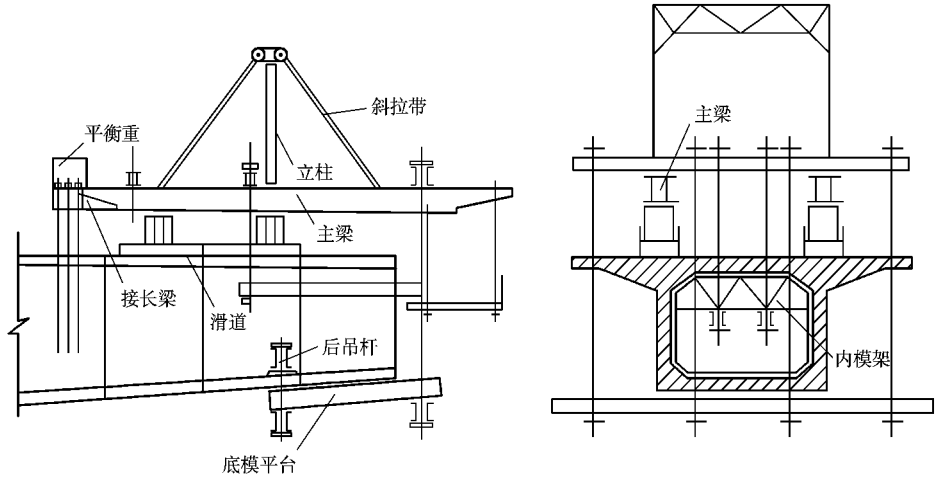


图 4-2-3　**三角形组合梁式挂篮**

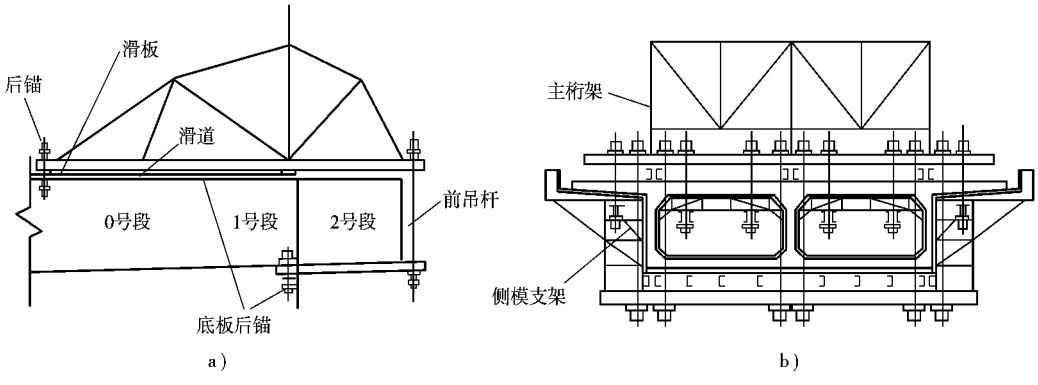


图 4-2-4　**弓弦式挂篮**

a)**挂篮侧面**；b)**挂篮正面**

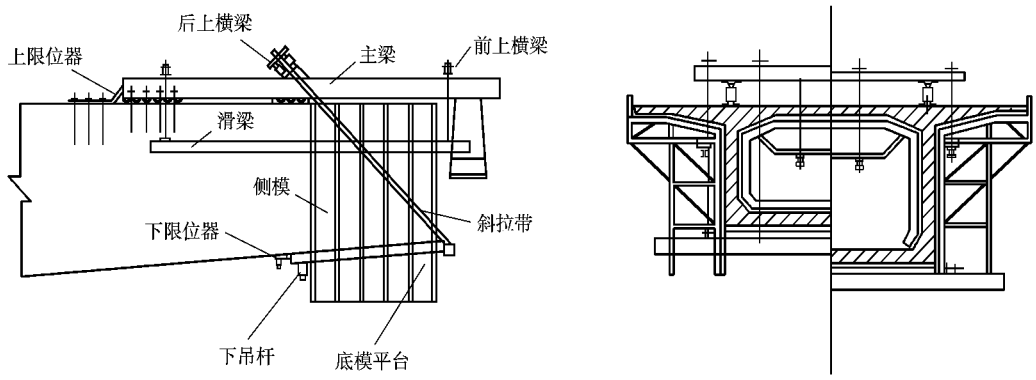


图 4-2-5　**滑动斜拉式挂篮**

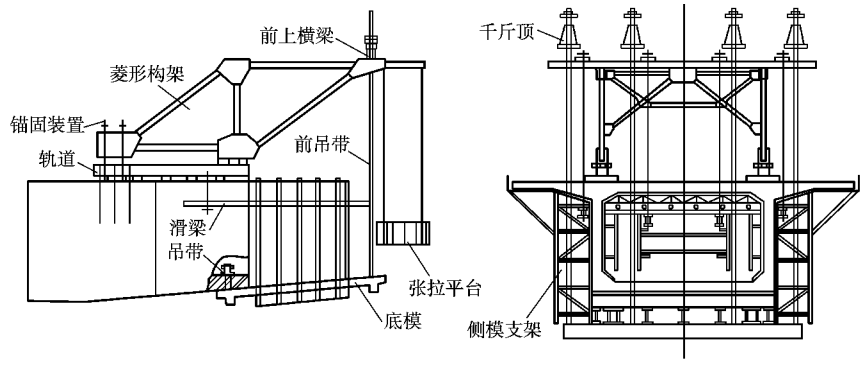


图 4-2-6　**菱形桁架式挂篮**

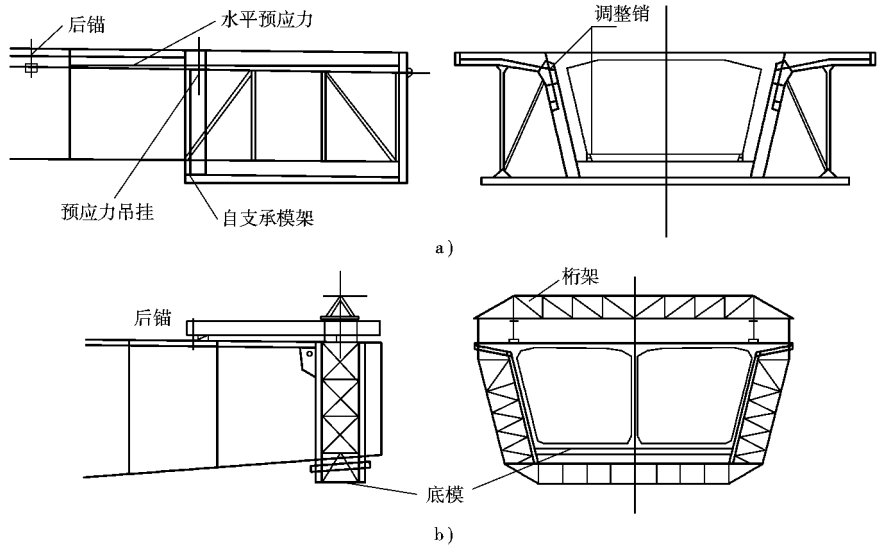


图 4-2-7　**自承式挂篮**

(2)挂篮的主要特点

①平行桁架式挂篮

平行桁架式挂篮的上部结构一般为一个等高桁梁，其受力特点是：底模平台及侧模支架所承重力均由前后吊杆垂直传至桁架节点和箱梁底板上，故又称吊篮式结构，桁架在梁顶用压重

或锚固或二者兼之来解决倾覆稳定问题，桁架本身为受弯结构。

②平弦无平衡重挂篮

平弦无平衡重挂篮是在平行桁架式挂篮的基础上，取消压重，在主桁架上部增设前后上横桁，根据需要，其可沿主桁纵向滑移，并在主桁横移时吊住底模平台及侧模架。由于挂篮底部荷重作用在主桁架上的力臂减小，大大减小了倾覆力矩，故不需平衡压重，其主桁后端则通过梁体竖向预应力筋锚固于主梁顶板上。

③弓弦式挂篮

弓弦式桁架（又称曲弦桁架式）挂篮主桁外形似弓形，故可认为是从平行桁架式挂篮演变而来，除具有桁高随弯矩大小变化、受力合理的特点外，还可在安装时在结构内部预施应力以消除非弹性变形，故也可取消平衡重，所以一般重力较轻。

④菱形挂篮

菱形挂篮可认为是在平行桁架式挂篮的基础上简化而来，其上部结构为菱形，前部伸出两伸臂小梁，作为挂篮底模平台和侧模前移的滑道，其菱形结构后端锚固于箱梁顶板上，无平衡压重，而且结构简单，故自重大大减轻。

⑤滑动斜拉式挂篮

滑动斜拉式挂篮在力学体系方面有较大突破，其上部采用斜拉体系代替梁式或桁架式结构的受力，而由此引起的水平分力，通过上下限位装置（或称水平制动装置）承受，主梁的纵向倾覆稳定由后端锚固压力维持，其底模平台后端仍吊挂或锚固于箱梁底板之上。

⑥预应力斜拉式挂篮

预应力斜拉式挂篮的最大特点是利用梁体内腹板的预应力筋拉住模板，从而使得挂篮结构简化，重力变小。

⑦三角形组合梁挂篮

三角形组合梁挂篮是在平行桁架式挂篮的基础之上，将受弯桁架改为三角形组合梁结构。由于其斜拉杆的拉力作用，大大降低了主梁的弯矩，从而使主梁能采用单构件实体型钢，由于挂篮上部结构轻盈，除尾部锚固外，还需较大压重。其底模平台及侧模支架等的承重传力与平行桁架式挂篮基本相同。

⑧自承式挂篮

自承式挂篮分为两种：一种是模型支承在整体桁架上，桁架用销子和预应力筋挂在已成箱梁的前端角上，灌注混凝土时主梁和可移动桁架移至一边，挂篮前行时再安上，吊着空载的模板系统前移；另一种是将侧模制成能承受巨大压力的刚性模板，通过梁上的水平及竖直预应力筋拉住模板来承担混凝土重，移动方法与前者相同，由临时吊车悬吊着模板系统前移到下一梁段。这种方法对跨度不很大的等高度箱梁较为适宜。

（3）挂篮的适用性

平行桁架式挂篮由于其自重大，一般已不大采用。平弦无平衡重挂篮由于主桁上部的上横桁可根据需要沿纵向移动，并在主桁横移时吊住模板系统，故可取消压重，具有一定优点，但由于其并未从根本上克服平行桁架式挂篮机构庞大、自重较大的缺点，应用不是很广泛。弓弦式挂篮由于杆件以常备式为主，而且自重较轻，桁高随弯矩大小而变化，受力较合理，对不想一次性投入过多的施工单位有一定吸引力，但其缺点是杆件数量多、制作安装都较麻烦，且易丢失。菱形挂篮具有结构简单、受力合理和一次移动到位等特点，较受欢迎。滑动斜拉式挂篮由于兼有自重轻和无平衡重等特点，被认为是国内目前最轻的挂篮之一。但当跨度和梁高都较

大时，由于斜拉杆长度较大，弹性伸长较大，而且上下限位装置的水平力随之增大，故使其应用受到一定的限制。预应力斜拉式挂篮系利用梁部结构本身的预应力束拉紧刚性模板，使得临时设施数量大大减少，但因属永久结构和临时结构相结合，需设计、施工及建设单位意见一致方可采用。此外，对于预应力束在锚固模板系统时的锚下控制张拉力，锚具的可靠度，锚具对预应力束的刻压损伤等问题都应综合予以考虑，做到既能安全地完成悬灌作业，又能保证预应力束在运营期间的耐久性和可靠度。三角型组合梁挂篮虽然较平行桁架式挂篮轻，但仍需一定量的压重，故应用受一定限制。自承式挂篮的两种形式本质上与预应力斜拉式挂篮并无很大区别，唯一不同的只是预应力筋采用特殊设计，并配置必要的定位销和钢销。

2. 几种常用挂篮的结构构造及设计

(1)滑动斜拉式挂篮

①挂篮的结构及构造

滑动斜拉式挂篮的主要结构是：主梁(纵梁)、各种横梁、斜拉带系、模板系统(包括底模、侧模、及内模等)、滑梁、上下限位装置等。

主梁是挂篮的主要受力结构之一，承受梁段混凝土及模板系统等重力。每根主梁由两根工字钢组合而成，其通过钢垫板、枕木等支垫在桥面上。主梁后部在两工字钢间用竖向预应力筋通过压紧器锚固在已灌梁段的顶面，主梁尾部连接限位压板，仍用竖向预应力筋压紧在桥面上，以限制主梁在重载时前移。如图 4-2-8a)所示。

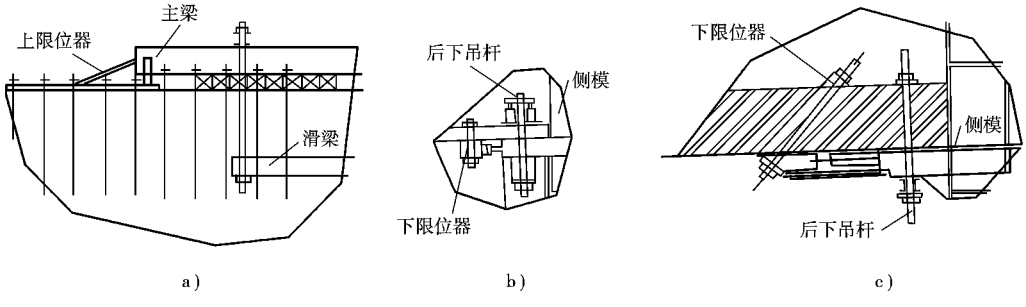


图 4-2-8　上、下限位器示意图

上横梁及斜拉横梁由槽钢拼接(或焊接)而成，前者除把主梁连成整体外，主要用来吊挂内外模板系统，后者将斜拉带传来的底模及灌注梁段混凝土重力再传递给主梁。

斜拉带是挂篮最关键的构件，一般用 16Mn 或其他性能更优的钢板制成，每一拉杆一般做成 4～5 段，各段端部设有销孔，组装时用钢销连接成整体，并可随梁高的变化增减。斜拉带上端通过元宝梁固定在斜拉横梁上。元宝梁下置放两组千斤顶，用以调节底模高程。模板系统由内模、外模及底模组成，内模模架用型钢栓接或焊接而成，模板可用木模外包铁皮或组合钢模和填充木模组成，内顶模可沿悬吊在顶板预留孔上的型钢滑道前移，也可用可调高支柱支撑在底模上，以便适应梁高变化。外侧模及支架通过滑梁吊挂在挂篮横梁上，外模以钢制大模板为宜。底模固定在底模平台上，底模平台由纵梁和前后下横梁组成，前下横梁与斜拉杆铰接，后下横梁通过后下锚杆锚固在箱梁底板上。

滑梁由两个槽钢组成，其后端通过吊杆或吊索吊挂于箱梁顶板外翼缘上，而当挂篮移动前，滑梁则取掉后吊点，落于侧模支架的滚筒上由前吊杆带动与主梁一起前移就位。

上限位器如前所述。下限位器设于下后横梁后侧，分为竖直和斜向两种，其与底模平台顶紧，以承受传来的水平力。当限位器为竖直时，在水平力作用下其受弯，受力状况较差，但锚固

杆较短。当为斜向设置时，其以受拉为主并兼受少量弯矩，受力状况大大改善，但锚固杆相应加长，拆装不太方便，如图 4-2-8b)、c)所示。

②挂篮受力分析

如图 4-2-9 所示，灌注梁段混凝土的重量落于底模平台上，其前端通过铰将此力及底、侧模重力传至斜拉杆，后端通过后锚杆将垂直力传至箱梁底板混凝土上。由于斜拉杆为拉力杆，故其轴向力分解为垂直力和水平力，其水平力通过底平台纵梁传至尾部，由下限位器承担。同理，斜拉杆在上部将轴向力传给上横梁进而传给上主梁，其垂直分力由主梁传给箱梁顶板，水平分力则由主梁传给上限位器，并由竖向预应力筋压紧限位拉板与混凝土桥面间产生的摩擦力平衡。

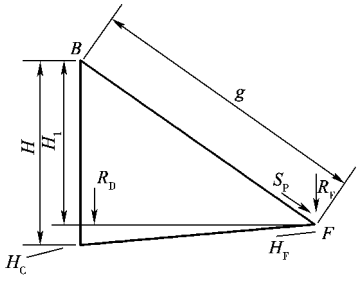


图 4-2-9　滑动斜拉式挂篮受力示意图

挂篮底模及侧模前移时的重力全部由滑梁承受。

(2)菱形挂篮

①挂篮的结构及构造

菱形挂篮主要由菱形桁架、提吊系统、走行系统、模板及张拉操作平台五部分组成。

菱形桁架：

菱形桁架是挂篮的主要承重结构，两片主桁构架竖放于箱梁腹板位置，其间用槽钢及角钢组成的横联连接。菱形桁架的主桁杆件根据受力要求均用较大型号的槽钢组焊而成，杆端可用节点板栓接，也可采用焊接，主桁前端在节点处放置一根用 2 根工字钢组焊成的横梁，上设 8 个吊点，其中 4 个作吊底模平台用，另 4 个吊内外模滑梁用，该横梁同时起到将两片桁架连成整体的作用。

前后吊带(杆)：

前后吊带(杆)的作用是为底模平台提供前吊点，其承受几乎一半的挂篮荷载。当待灌段混凝土重力较大时，一般采用吊带否则用吊杆。吊带一般用 16Mn 或性能更好的钢板并布设销孔而成，一般约每 3m 一段，分段间用销轴连接，以适应不同梁高的需要。当采用吊杆时，钢材一般用冷拉 IV 级精轧螺纹钢筋。每根吊带或吊杆在横梁上放 2 台千斤顶通过扁担梁调整底模的高程。

后吊带(吊杆)从箱梁的底板预留孔中穿过，一般用 16Mn 上布调节孔或 45 号钢棒带螺帽形成，下端与底模平台相连，上端 2 台千斤顶和扁担梁或螺帽支承在箱梁底板顶面上。后吊带(杆)的作用是承受挂篮约一半的荷载并将其传给箱梁底板。

模板系统：

箱梁外侧模一般采用钢制大模板，并沿梁高分为 3 块左右，以随梁高变化拆装调整。外侧模支承在外模走行梁上，走行梁前端通过吊杆悬吊在已浇好的箱梁顶板预留孔上，后吊杆与走行梁间设有后吊架，其上装有滚动轴承，挂篮行走时，外模走行梁与外模一起沿后吊架滑行。

内模一般通过模架放置在两根内模走行梁上，走行梁前端吊在桁架横梁上，后端吊在已浇梁段顶板的预留孔上方，内模架可沿走行梁滑行，除角隅处外，平面部分可用组合钢模或木模钉铁皮。

底模由底模平台和底模板组成，底模架分纵、横梁，一般用槽钢或工字钢组成。底模一般用木模外钉铁皮形成。

张拉操作平台：

张拉操作平台通过钢丝绳悬吊在菱形桁架的前端小悬臂梁上，一般用角钢和钢筋组成，平台平面铺以木板供作业人员站立行走。可用手动葫芦调整其高度。

走行系统：

挂篮走行系统分为桁架走行系统、底模、外模走行系统及内模走行系统。

桁架走行系统布置为，在两片桁架下的箱梁顶面铺设两根用钢板组焊的轨道，轨道用竖向预应力筋通过短梁固定，轨道顶面放置前后支座，支座与桁架节点栓接，前支座沿轨道滑行（支座与轨道间垫四氟乙烯板），后支座以反扣轮的形式沿轨道顶板下缘滚动，不需加设平衡重。如图 4-2-10 所示。走行时用 2 个 5 t 手动葫芦纵向牵引即可。轨道分节以便向前倒用。悬臂灌注前，需用 IV 级冷拉精轧钢筋将轨道上钢枕与桁架后节点锚固，使后支座反扣轮不受力。

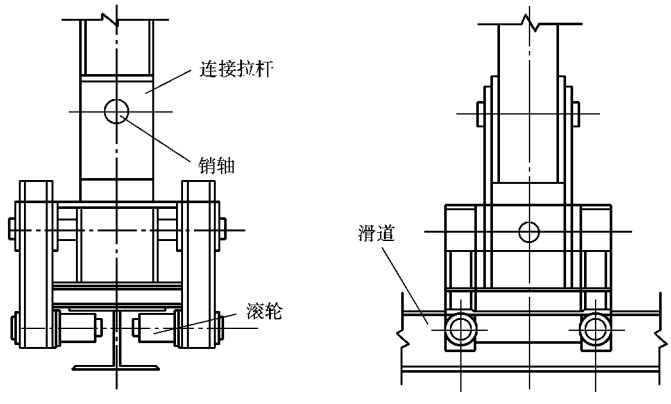


图 4-2-10　菱形挂篮走行反扣装置

底模及外模与主桁同步行走。具体步骤为：脱模前用手动葫芦将底模架吊在外模走行梁上，解除后吊带，脱模后，底模随桁架一起向前走行。

内模脱模后，内模架落在走行梁上，人工用手动葫芦即可将其移至下一梁段。

②菱形挂篮的力学分析

从总体看，挂篮荷载约一半通过后吊带（或吊杆）传至主桁上节点，菱形桁架以铰接模式计算杆力，其前下节点支于箱梁顶板前侧，后下节点则通过竖向预应力筋锚于梁上。

（3）弓弦式挂篮

①挂篮的结构及构造

弓弦式挂篮由弓弦桁架；前吊杆、后锚栓；模板系统；走行系统等四部分组成。

弓弦桁架：

桁架弧杆全为拉杆，腹杆全为压杆，两者均用万能杆件 N1 杆组拼而成，弓弦杆用槽钢组拼，并与弧杆铰接，其余用节点板螺栓连接。主桁片设于箱梁腹板上方，两桁片间以万能杆件平联连接，后锚梁亦为两槽钢组拼成的空腹工字型梁。为消除桁架拼装时产生的非弹性变形，对桁架施预应力，使弦杆上翘，同时改变了桁架的受力。

前吊杆及后锚栓：

前吊杆全部采用冷拉 IV 级精轧螺纹钢筋，按设计预留上拱度，用螺栓连接于桁架前桁梁与底模前横梁上，将挂篮约一半的荷载传至桁架上。

后锚栓采用 IV 级冷拉精轧螺纹钢筋或 45 号钢棒，除后横梁预留调升高程的千斤顶位置外，其余部位通过对后锚栓施以一定的预拉力，使模板产生预压弹性变形，密贴于已灌箱梁底而不漏浆，后锚栓承担挂篮约一半的荷载并将其传至箱梁底板上。

模板系统：

外模、内模及顶板底模与滑动斜拉式挂篮的结构构造基本相同。

走行系统：

分为弓弦桁架走行系统，底模、外模走行系统及内模走行系统三部分。

弓弦桁架走行系统与菱形挂篮基本相同。

底模、外模走行系统与滑动斜拉式挂篮基本相同。

内模走行系统与菱形挂篮也基本相同。

②挂篮受力分析

如图 4-2-11 所示，弓弦式挂篮的受力与菱形挂篮基本相同，唯一不同的曲面桁架弓弦杆除后锚杆外，在中部有时也需提供竖向预应力的锚固，以减小局部杆件的受力。

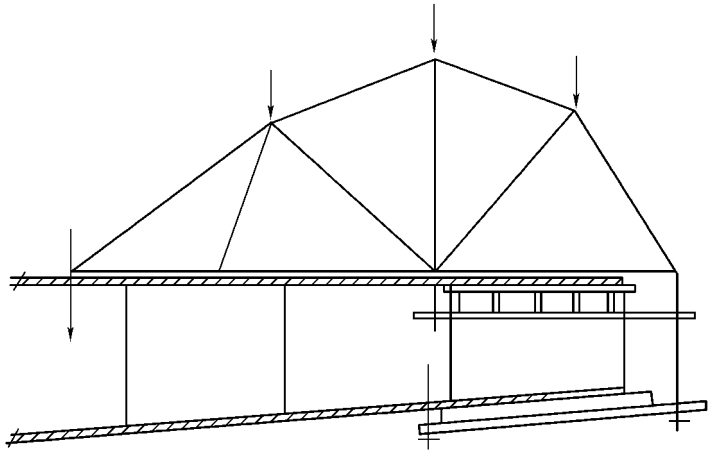


图 4-2-11　弓弦式挂篮受力示意图

(4)三角形组合梁式挂篮

①挂篮的结构及构造

挂篮由底模平台，悬挂调整系统，三角形组合梁，滑行系统，平衡及锚固系统，工作台等组成。每个挂篮有两片三角形组合梁。

底模平台及悬挂调整系统：

底模平台及悬挂调整系统与菱形挂篮基本相同。前吊带一般设销孔配合螺旋千斤顶调整底模高程，底模后吊杆处可用千斤顶或砂筒卸载。

三角形组合梁：

三角形组合梁由 I 型或 II 型主梁和立柱、斜拉钢带及型钢平联等组成，三角形组合梁下为支座和滑道。

立柱比理论长度一般短 25mm 左右，装上立柱和斜拉钢带后要用千斤顶起顶立柱，其顶力的大小由已悬挂的重力经计算确定，并应适当增大初始起顶力，以消除非弹性变形，尔后再降到计算顶力值。用钢板塞紧柱底后松顶，主梁、立柱、斜拉带即形成一个紧密结合的结构体。

滑行系统：

每片三角梁下有前后两个钢支柱，主梁与前支座连接处设有扁钢形成的支座铰，其与梁用带弹簧的螺栓连接，目的是保证前支座底板的压力均匀，又容许主梁有少量变形。支座下为 30mm 的不锈钢滑板。

在箱梁上铺短木枕，前支座下要铺满硬杂木枕或钢筋混凝土枕，以减少整个挂篮的变形。枕木上设置平直的形滑槽，槽内放厚 3mm 的聚四氟乙烯板。枕木、滑道和聚四氟乙烯板随挂篮的前移而向前倒用，走行时挂篮要设止滑绳。

压重和后锚：

为维持走行时的纵向稳定性，在三角组合梁的尾部设钢锭或型钢压重，要求纵向抗倾覆稳定安全系数 $K=1.3$，在挂篮就位后组合梁的尾部用螺栓与箱梁的竖向预应力筋相连锚固。

②挂篮的受力分析

挂篮的受力情况与菱形挂篮基本相似，唯一不同的是尾部一般需压重。

二、用挂篮悬臂灌注施工的主要工艺程序及特点

用挂篮逐段悬拼浇筑施工的主要工艺程序为：灌注 0 号段；拼装挂篮；灌注 1 号（或 2 号）段；挂篮前移、调整、锚固；灌注下一梁段；按顺序完成悬臂灌注；挂篮拆除；合龙。以下结合几种常用挂篮予以叙述。

1. 0 号段的灌注

0 号段位于桥墩上方，灌注 0 号段相当于给挂篮提供一个安装场地。0 号段的长度依两个挂篮的纵向安装长度而定，有时当 0 号段设计较短时，常将对称的 1 号段灌注后再安装挂篮。0 号段（1 号段）一般需在桥墩两侧设托架或支架现浇，如图 4-2-12 所示。立 0 号段底模时，同时安装支座及防倾覆锚固装置。

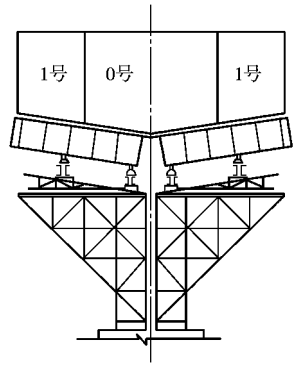


图 4-2-12　墩旁托架示意图

2. 拼装挂篮

挂篮运至工地时，应在试拼台上试拼，以发现由于制作不精确及运输中发现变形造成的问题，保证正式安装时的顺利及工程进度。

(1)滑动斜拉式挂篮拼装

①0 号段施工完毕后，在墩顶帽上顺桥轴线方向两侧安装三角托架。

②在 0 号段顶设简易扒杆吊装挂篮主梁，并用压紧器将主梁锚固在梁体上。在主梁上安装横梁、三角铁、主梁风撑等。注意灌注 1 段时一侧主梁为正常长度，另一侧为接长梁，并与正常主梁栓接成整体。不用后限限位器。当滑至 2 号段时，将一侧的接长梁换为正常主梁并将其尾部用节点板相连，悬灌到 3 号梁段以后，两挂篮分开并在尾部加后上限位器，各自对称独立作业。如图 4-2-13a)、b)、c)所示。

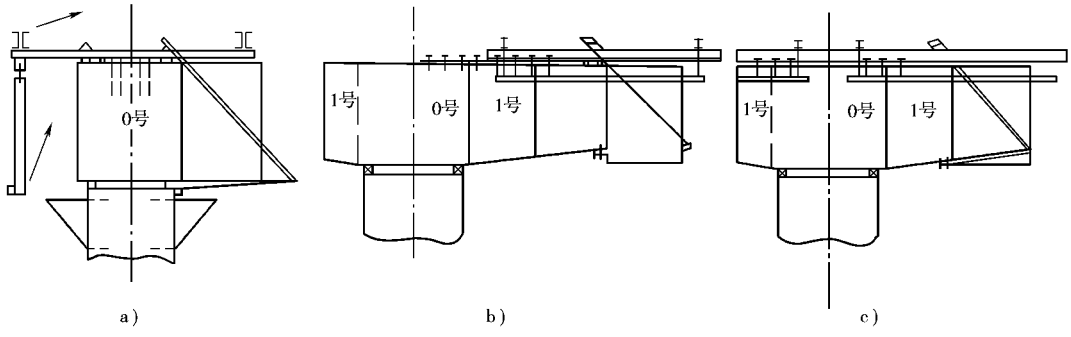


图 4-2-13　滑动斜拉式挂篮安装示意图

③用已安装的主梁吊装底模系统(包括前下横梁及纵梁和底模及外侧模)。底模平台的后下横梁支承在墩身侧面的三角托架上。

④安装两根内侧斜拉带。

⑤安装外侧模,用活动槽钢将外侧模固定在前后下横梁上,安装两根外侧斜拉带。

⑥绑扎 1 号梁段部分钢筋后,立箱梁内模,绑箱梁顶部钢筋,再用斜拉带调整模型位置。

(2)菱形挂篮拼装

菱形挂篮悬臂灌注时一般从 1 号或 2 号段开始,并且两侧挂篮一开始就独立作业。当桥墩不很高时,其杆件一般用较大吨位的汽车吊直接提升,当桥墩较高或桥下地形不允许,或有较深的水流存在时,可用缆索吊或浮吊及扒杆等提升。挂篮的拼装程序如图 4-2-14 所示。

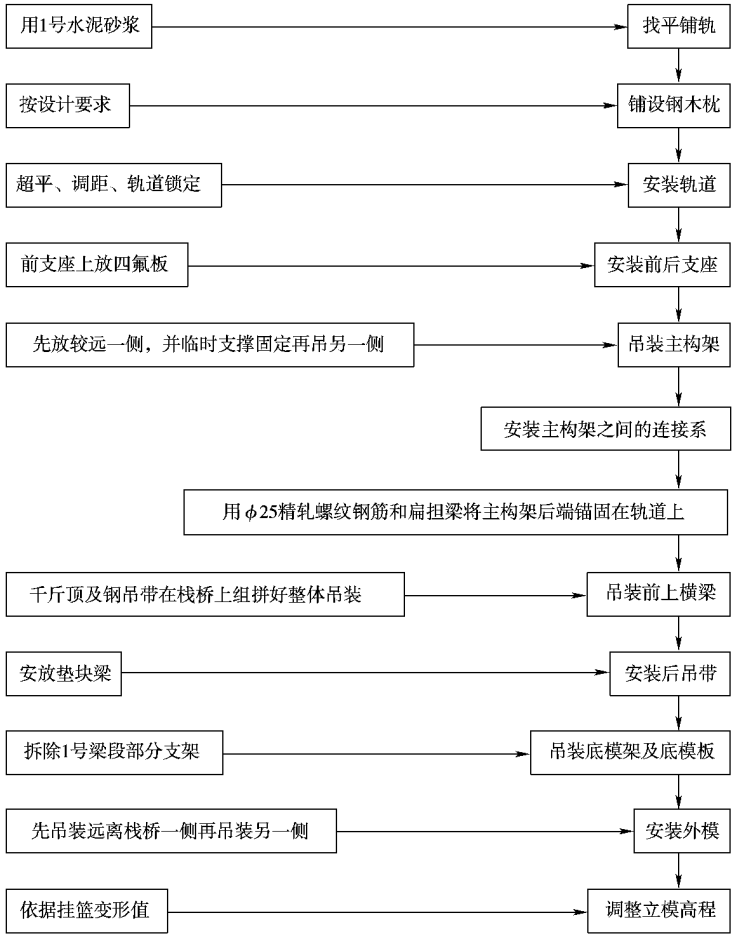


图 4-2-14　挂篮施工流程图

(3)弓弦式挂篮的安装

①先在箱梁腹板顶面铺好木枕、钢轨作为滑道,然后安装弦杆、腹杆、弓弦杆及联系杆件。

②两侧挂篮尾部相互连接,形成一个整体桁架。具体连接方式为弦杆采用铰接,弓弦杆采用附设拉杆铰接。如图 4-2-15 所示。

③在 0 号段外侧模设有滚动轴的桁梁下穿入滑梁,将底模与外模间撑拉联系放松,在自重作用下,脱模于滑梁上,用手动葫芦牵引就位。

④1 号段箱梁施工完毕后,两挂篮解体,各自移动到位并用手动葫芦在尾部牵拉,然后接

长弦杆、弧杆，安装后锚梁，此后两挂篮对称独立作业。

(4)三角形组合梁挂篮的安装

①在 0 号及 1 号段上安装梁顶滑道，然后安装支座及三角形组合梁。并将其两尾部相连并锚固，配置压重，如图 4-2-16 所示。吊挂相应吊带(杆)。

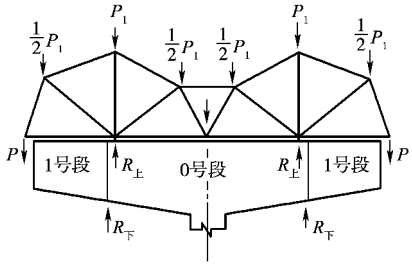


图 4-2-15　弓弦式挂篮尾部连接示意图

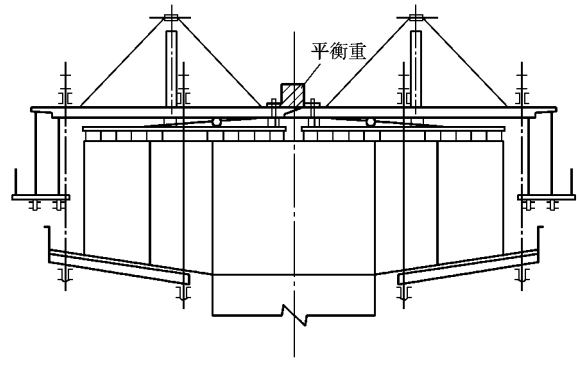


图 4-2-16　三角形组合式挂篮尾部连接示意图

②将底模平台及侧模支架作为整体起吊，与相应吊点相连接，后下横梁则用吊杆支承在箱梁底板上。

③将内部顶模吊挂在前后吊杆上。

④从 3 号段开始，两挂篮分开作业，其主梁尾部各安装接长梁，并将主梁后端锚固在箱梁顶面上。

3. 挂篮的行走

(1)滑动斜拉式挂篮的行走

①用手动葫芦把前下横梁固定在箱梁梁体上，松开斜拉带顶端千斤顶，并拆卸斜拉带。

②用压轮器更换主梁压紧器。用手动葫芦把主梁系统牵引到下一梁段设计部位，此时侧模滑梁在前上吊杆的带动下，沿侧模支架上的滚筒一起前行。

③用手动葫芦将底模平台吊挂在滑梁上，拆除后下吊杆，将底模平台通过侧模支架落在滑梁滚筒上，并用手动葫芦牵引就位。

④安装斜拉带、后下吊杆、后下限位器等。

⑤将内模落于内模滑梁上，用手动葫芦牵引就位。

(2)菱形挂篮的行走

①用手动葫芦将底模平台吊在外侧模走行梁上，解除后吊带，将其落于滑梁上。

②松开菱形桁架的上锚固，使其后支座反扣在轨道上缘，用千斤顶顶推或用手动葫芦牵引主桁并带动侧模及底模平台沿滑道前行到位。

③将内模落于内走行梁上，用手动葫芦牵引就位。

(3)弓弦式挂篮的行走

①将底模平台及外模用手动葫芦吊挂在箱梁及滑梁上，并松开前吊杆及后锚固。

②用手动葫芦将弓弦桁架沿梁顶滑道牵引到位，此时滑梁同时在前吊杆带动下同步到位。

③将底模平台通过外模支承在滑梁的滚筒上，用手动葫芦将其牵引到位。

④将内模下落在内滑梁上，用手动葫芦牵引到位。

4. 梁段混凝土的灌注施工

梁段混凝土的悬臂灌注一般用泵送，坍落度一般控制在 14～18cm ，并应随温度变化及运

输和浇筑速度作适当调整。其主要注意事项如下：

(1)箱梁各节段混凝土在灌注前，必须严格检查挂篮中线，挂篮底模高程；纵、横、竖三向预应力束管道；钢筋、锚头、人行道及其他预埋件的位置，认真核对无误后方可灌注混凝土。其高程中线的误差标准的制定，应较现行规范混凝土梁的灌注尺寸允许误差扣除模板变形等影响的数字为小。箱梁各节段立模高程＝设计高程＋预拱度＋挂篮满载后自身变形，其中徐变对挠度的影响除作结构电算分析外，有条件时，应做现场徐变试验对比，以使徐变系数的取值更加符合工程实际。此外，后灌注的梁段应在已施工梁段有关实测结果的基础上做适当调整，以逐渐消除误差，保证结构线形匀顺。

(2)若能全断面依次灌注最好，否则应按以下顺序灌注：二次灌注，第一次由底板至腹板下承托；第二次为剩余部位。三次灌成，第一次由底板至腹板下承托；第二次由腹板下承托至腹板上承托预应力管道密集处以上，第三次由腹板上承托至顶板。

(3)混凝土的灌注宜先从挂篮前端开始，以使挂篮的微小变形大部分实现，从而避免新、旧混凝土间产生裂缝。

(4)各节段预应力束管道在灌注混凝土前，宜在波纹管内插入硬塑管作衬填，以防管道被压瘪；管道的定位钢筋应用短钢筋作成井字形，并与箱梁钢筋网架妥为固定，定位钢筋网架间距应保持在 0.5～0.8，以防混凝土振捣过程中波纹管道上浮，引起预应力张拉时产生沿管道法向的分力，轻则产生梁体的内力不合理，重则产生混凝土崩裂，酿成严重事故。

(5)施工时应在挂篮上设风雨篷，避免混凝土因日晒雨淋而影响全天候作业的设备，以提高作业效率和保证质量。冬季施工应备保温设施。

(6)箱梁混凝土灌注完毕后，立即用通孔器检查管道，处理因万一漏浆等情况出现的堵管现象。

三、预应力混凝土连续梁悬灌施工的合龙

1. PC 连续梁的合龙程序

(1)从一岸顺序悬灌、合龙。如图 4-2-17 所示。

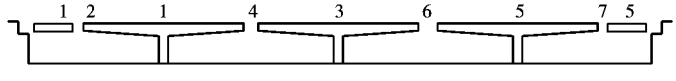


图 4-2-17　从一岸顺序合龙示意图

这种方法可使施工机具、设备及材料从一岸通过已成结构直接运输到作业面或其附近；另外，在施工期间，单 T 构悬灌完后很快合龙，形成整体，故未成桥前结构的稳定性和刚度较强。但作业面较少，对工期较紧者不适用。

(2)从两岸向中间悬灌、合龙。

此法与上述的区别在于可以其可增加一个作业面，故进度相应加快。

(3)按 T 构连续梁顺序合龙，如图 4-2-18 所示。

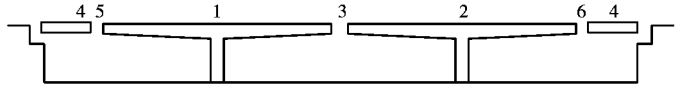


图 4-2-18　从两岸向中间合龙示意图

此法的具体程序是将所有悬臂施工部分由简单到复杂地连接起来，最后在边跨或次边跨合龙。其优点是对于大跨和多跨连续梁桥施工，能尽可能多地布置工作面，也可对称地悬灌和

合龙，故对工期较紧的长联连续梁桥施工较为适用，此外，由于可对称地悬灌和合龙，故对结构受力及分析较为有利，对收缩、徐变的控制尤其如此。其缺点是在结构总合龙前，单元呈悬臂状态的时间较长，稳定性较差，在风力较强的地区采用时应予慎重考虑。

应当指出的是，不同的悬灌和合龙程序，其引起的结构恒载内力不同，体系转换时由徐变引起的内力重分布也不相同，故采用不同的悬灌和合龙程序将在结构中产生不同的最终恒载内力，对此应在设计和施工中予以充分考虑。

2. PC 连续梁的合龙技术措施

(1)连续梁合龙时的墩、梁临时固结约束措施

①利用悬灌时梁与墩的双排预应力锚杆和临时支座固结，即将锚杆的下端预埋在墩顶，灌注梁部混凝土时将其引伸至梁顶，混凝土等强后予以张拉锚固，即形成约束。

②在墩顶和梁部预埋型钢固结，必要时可附设预应力筋锚固，如图 4-2-19 所示。

③将活动支座的顶、底板在顺桥向的两侧用钢板临时焊接，形成固结的约束，如图 4-2-20 所示。

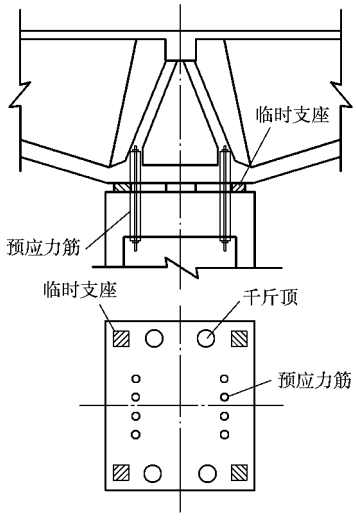


图 4-2-19　墩顶临时固结措施

(2)合龙口的临时锁定支承

①内外刚性支撑锁定措施，如图 4-2-21 所示。这种锁定措施是在箱梁顶、底板的顶面预埋钢板，并将外刚性支撑焊接(或栓接)在其上；并在箱梁顶、底板中沿纵向设置内刚性支撑支顶共同锁定合龙口。因内刚性支撑仅能抗压且吸收部分预应力，且用钢量较多，故已不多采用。

②外(或内)刚性支撑和张拉临时束共同锁定。即除用外(或内)刚性支撑锁定外，再利用永久性的部分预应力束临时张拉，以抵抗降温时产生的收缩变形。

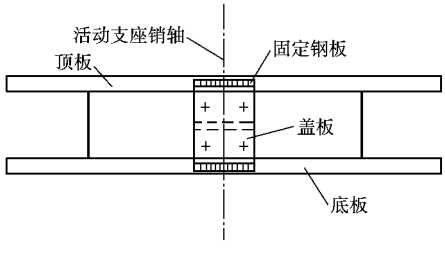


图 4-2-20　活动支座临时固定措施

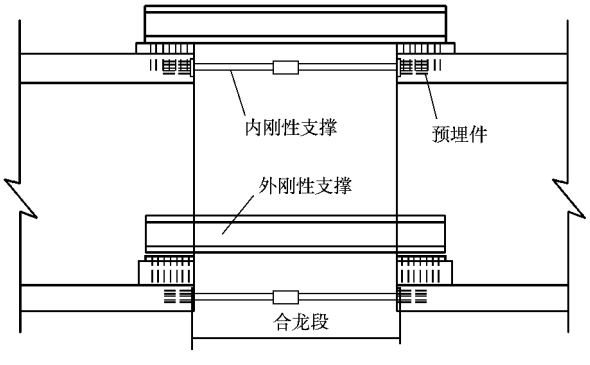


图 4-2-21　内外刚性支撑示意图

③仅设外(或内)刚性支撑锁定。即根据实际受力要求，仅布置外(或内)刚性支撑即可满足要求时，可仅用一种锁定措施。例如边跨若用膺架法灌注混凝土时，其合龙口另一侧的悬灌长度一般较小，加之低温合龙，以及膺架对边跨的摩阻力作用，往往就可仅用外(或内)刚性支撑即可抵抗升温时的膨胀力。

一般来说，应尽量采用外刚性支撑加张拉临时预应力束的锁定措施，或者仅设外刚性支撑的锁定措施，以尽可能保证合龙段混凝土中的预应力值满足设计要求。

3. PC 连续梁的合龙力学分析

(1)温差产生的轴向力分析

为简化计算，将温度变化产生的轴向内力按线膨胀计算，并将变截面箱梁分段按其平均截面计算。假定合龙两侧支座处在温度变化时仍锁定，如图 4-2-22 所示。

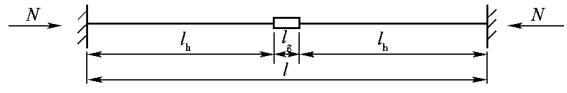


图 4-2-22　温度应力计算图示

设梁升温 Δt 时产生的自由伸长量为 Δl_t，由于两端约束产生的缩短为 Δl_N，则

$$\Delta l_t = \alpha_g \Delta t l_g + 2\Delta t \alpha_h l_h \tag{4-2-1}$$

因 $\alpha_g = \alpha_h$ 有

$$\Delta l_t = \alpha_h \Delta t (l_g + 2l_h) = \alpha_h \Delta t l \tag{4-2-2}$$

又

$$\Delta l_N = \frac{N \cdot l_g}{E_g A_g} + 2\sum_{i=1}^{n} \frac{N \cdot l_h^i}{E_h A_h} = \left[\frac{l_g}{E_g A_g} + 2\sum_{i=1}^{n} \frac{l_h^i}{E_h A_h^i} \right] \tag{4-2-3}$$

假设两端墩身无位移，则依变形协调原理

$$\Delta l_t = \Delta l_N$$

得

$$N = \frac{\alpha \Delta_t l}{\dfrac{l_g}{E_g A_g} + 2\sum_{i=1}^{n} \dfrac{l_h^i}{E_h A_h^i}} \tag{4-2-4}$$

式中：N——梁因升温所受的轴向力；

α_h、α_g——分别为混凝土和钢的线膨胀系数；

l、l_h、l_g——分别为合龙跨总长及悬臂灌注段长度和合龙口的钢支撑长度；

E_g、E_h——分别为钢和混凝土的弹性模量；

A_h^i——箱梁的第 i 段的平均截面积；

l_h^i——箱梁的第 i 段的分段长度。

因为合龙期很短，在此期间混凝土发生的徐变很小，可予忽略，则刚性支撑上所受的压力即约等于 N。依一般情况，假定合龙期间的梁产生 15℃ 的温差，则对中、大跨的箱型梁来说，由于其截面较大，将会产生数千吨的温度内力，如此大的力是一般的刚性支撑杆件无论从本身和连接承力都难以承受的，故为了节省临时工程费用和方便施工，宜在合龙口锁定后立即释放一端的支座固结约束。

当合龙口一端支座固结约束取消后，其一端梁可沿支座滑动，此时合龙口刚性支撑的受力情况为：

当升温 Δt 时有

$$N = Qf + N_y \tag{4-2-5}$$

式中：N——合龙口刚性支撑所受压力；

Q——合龙跨半跨及相连自由伸缩段梁的自重；

f——支座摩阻系数，对盆式橡胶支座可取 0.06 左右；

N_y——预应力临时张拉束提供的预压力，若仅设刚性支撑时，此项为零。

当降温时有

$$N = N_y - Qf \tag{4-2-6}$$

由升、降温时的受力分析可见，升温时控制，且按一般中、大跨度连续梁计算的刚性支撑内力仅数百吨，远远小于合龙跨两端支座锁固时的内力。

实际合龙时，可根据气候情况及合龙前的梁温测试数据，预估合龙口锁定后至新灌混凝土达到足够强度前可能产生的降温值 Δt，然后依据 Δt 求得梁降温时所产生的温度内力。若其小于 Qf，则可不设或少设临时预应力束；若其大于 Qf，依据抗裂安全系数的要求，即可求出所需预应力临时束的张拉力，亦即：

令

$$N=N_y-Qf=0$$

$$N_y=Qf \tag{4-2-7}$$

若设抗裂安全系数为 K_f，则

$$N_y/Qf=K_f \tag{4-2-8}$$

$$N_y=K_fQf$$

$$N=K_fQf-Qf=(K_f-1)Qf \tag{4-2-9}$$

相应地，升温时的轴向力则变为：

$$N=K_fQf+Qf=(K_f+1)Qf \tag{4-2-10}$$

若取 $K_f=1.2$，则

$$N=2.2Qf \tag{4-2-11}$$

依此力即可计算、选定内(外)刚性支撑的截面。

(2)合龙口的弯曲问题

一般来说，中跨梁合龙口两端的悬臂部分长度和截面都基本对称，在合龙的短时期内，两端悬臂因箱梁竖向温差产生的合龙口挠度基本相同，合龙口刚性支撑仅承受角变位产生的弯矩。当边跨或次边跨合龙时往往一端是膺架现浇梁，一边是悬灌梁；或一端是等截面梁，一边是变截面梁。而对前者而言，当合龙口是用吊架浇筑混凝土时，与后者一样，箱梁竖向温差都会使合龙口梁截面产生挠度差和角变位，使合龙段混凝土受弯，为抵抗此类弯矩一般需设外刚性支撑。

合龙口温差产生的弯矩的精确计算较为复杂，多用电算手段分析。当需估算时，也可假定两侧悬臂部分为悬臂梁用共轭梁法或其他方法计算出各梁端的自由状态下的挠度和角变位，然后求外刚性支撑所受弯矩，即可验算其强度。

需要指出的是，合龙口在上述情况下也受剪切，由于其剪切力较小，为抗弯而设的刚性支撑也可抵抗此剪力，故不另行考虑。这也为工程实践证明是可行的。

4. PC 连续梁的合龙施工要点

(1)掌握合龙期间的气温预报情况，测试分析气温与梁温的相互关系，以确定合龙时间并为选择合龙口锁定方式提供依据。

(2)根据结构情况及梁温的可能变化情况，选定适宜的合龙口锁定方式并作力学检算。

(3)选择日气温较低、温度变化幅度较小时锁定合龙口并灌注合龙段混凝土。

(4)合龙口的锁定，应迅速、对称地进行，先将外刚性支撑一端与梁端部预埋件焊接(或栓接)，再将内刚性支撑顶紧并焊连，尔后迅速将外刚性支撑另一端与梁连接，临时预应力束也应随之快速张拉。在合龙口锁定后，立即释放一侧的固结约束，使梁一端在合龙口锁定的连接下能沿支座自由伸缩。

(5)合龙口混凝土宜比梁体提高一个等级，并要求早强，最好采用微膨胀混凝土，并须作特殊配合比设计，浇筑时应认真振捣和养生。

(6)为保证浇筑混凝土过程中，合龙口始终处于稳定状态，必要时浇筑之前可在各悬臂端加与混凝土质量相等的配重，加、卸载均应对称梁轴线进行。

(7)混凝土达设计要求的强度后，解除另一端的支座临时固结约束，完成体系转换，然后按设计要求张拉全桥剩余预应力束，当利用永久束时，只需按设计顺序将其补拉至设计张拉力即可。

(8)临时束的张拉力一般宜在 $0.45\sim0.5R_y^i$，以防在合龙过程中预应力束过载报废而需重新更换新束。

(9)若考虑梁在合龙后的收缩、徐变的影响，可采用两种方法来处理：将梁收缩徐变值的影响视为梁降温来等效处理，即选择合龙温度时在原设计的基础上再降低一个 Δt 值，此 Δt 值即为梁收缩、徐变引起的缩短与梁降温产生的缩短的等效值；在合龙锁定前将梁预顶一个 Δl 值，即可抵消梁体后期收缩、徐变产生的收缩影响。

需要指出的是，预应力混凝土连续刚构的合龙与连续梁的合龙的区别在于：由于梁墩固结，不存在设置临时支座和墩梁固接的问题，其他方面与连续梁的情况类似，可以参照其合龙方法施工。

四、挂篮的发展方向

我国悬臂灌注施工挂篮经过多年的施工实践，已基本适应工程需要。现将部分桥梁所用挂篮的有关技术指标列于表 4-2-1 供参考。

国内部分桥梁挂篮表　　表 4-2-1

桥　名	最大跨度/最大段重	挂篮类型	挂篮主要特点	挂篮重/平衡重	挂篮总重/梁段重
广西柳州大桥	124m/92t	平行桁架式	万能杆件主桁，4 号段开始悬灌	75.7t/30t	105.7t/92t=1.15
福建乌龙江大桥	144m/120t	平行桁架式	万能杆件主桁	90t/无	90t/120t=0.75
武汉汉江大桥	135m/132t	平行桁架式	万能杆件主桁，1 号段开始悬灌	201.4t/86t	287.4t/132t＝2.18
湖南常德沅水大桥	120m/160t	平行桁架式	万能杆件主桁，3 号段开始悬灌	166t/无	166t/160t ＝1.04
广西红水河铁路斜拉桥	96m/100t	平行桁架式	万能杆件主桁，1 号段开始悬灌	77t/无	77t/100t ＝0.77
三门峡黄河公路大桥	160m/187.7t	平弦无平衡重式	前后上横桁吊挂底模平台抗倾覆，3 号段开始悬灌	98t/无	98t /187.7t＝0.54

续上表

桥　名	最大跨度/最大段重	挂篮类型	挂篮主要特点	挂篮重/平衡重	挂篮总重/梁段重

重庆长江北大桥	/144t	三角形组合梁式	三角桁架，2号段开始悬灌	73.2t/40t	113.2t/144t＝0.79
钱塘江二桥（公路）	80m/190t	三角形组合梁式	三角桁架		190t/160t＝1.19
湖北沙洋汉江桥	111m/100t	三角形组合梁式	三角桁架，2号段开始悬灌	56t/50t	106t/100t＝1.06
湖南株洲湘江大桥	90m/101t	滑动斜拉式	钢斜拉杆拉住底模架，1号段开始悬灌	31.5t/无	31.5t/101t＝0.31
湖北襄樊汉江长虹大桥	100m/104.6t	滑动斜拉式	钢斜拉杆拉住底模架，1号段开始悬灌	32.4t/无	32.4t/104.6t＝0.31
江苏南京草场门大桥	60m/87t	弓弦式	万能杆件为主的曲弦桁架，1号段开始悬灌	43.6t/无	43.6t/87t＝0.50
京九铁路泰和赣江特大桥	80m/140t	菱形	菱形钢桁架，2号段开始悬灌	46.8t/无	46.8t/140t＝0.33
大家河黄河大桥	/88.7t	桁架式	万能杆件主桁	55.4t/无	55.4t/88.7t＝0.64
黄石长江公路大桥	245m/265t	菱形	万能杆件为主的主桁，1号段开始灌注	104t/无	104t/265t＝0.39
广东虎门大桥辅航道桥	270m/240.5t	弓弦式	万能杆件为主的曲弦桁架，1号段开始灌注	88.7t/无	88.7t/240.5t＝0.37

1. 挂篮制作的系列化

挂篮作为PC连续梁（或刚构）悬臂灌注的一种常用设备，应用已很普遍。而目前国内的挂篮种类虽不少，但适应不同跨度和梁宽的系列化、规格化产品尚不多见，多数施工单位都是对不同跨度和梁宽使用一种挂篮，仅对其某些杆件作些调整，往往会因大马拉小车影响作业效率。产生这种现象的原因除产品开发滞后外，还有挂篮在具体一个施工单位的利用率问题，为此建议成立挂篮系列产品租赁公司，以便解决产品系列化、规格化和利用率的矛盾。此外，挂篮设计还应考虑PC梁悬灌段灌注的连续性，附设一些保证全天候作业的设施，供施工单位根据不同的需要选用。

2. 挂篮制作的工厂化

由于挂篮作业的安全性要求很高，一般来说，除一些可利用的常备式杆件外，挂篮的主要受力部件，特别是一些需作特殊处理的杆件，宜由具有一定资质的厂家加工制作，并需作严格的检测，以保证高空作业的绝对安全。

3. 挂篮施工作业的标准化和规范化

目前，我国桥梁施工规范对挂篮作了一些规定，但尚不够充分和完善；而国内出现的几起挂篮施工事故大多由于操作不当所致，建议在修订桥梁施工规范时，对主要挂篮的操作要求予以进一步的补充和明确。

4. 挂篮设计形式的新动向

(1)针对一般挂篮梁上结构占用悬灌作业场地的矛盾，国外有人设想将挂篮用箱梁的纵向预应力筋预张拉固定，承受灌注段的重力；而在梁顶设专门为滑移挂篮而用的结构，待完成滑移作业后将这部分结构后移，腾出作业场地。对此有必要作进一步的探讨与研究。

(2)针对弯梁桥，国内有关单位已研制出一种斜拉组合式挂篮，这种弯梁施工用挂篮既能纵向走行，又可横向转动，其组合位移便形成了沿桥梁的曲线走行。挂篮前移时，是用锚固于梁顶的上横梁维持大梁稳定的，挂篮转动是靠顶推挂篮后端实现的。这种挂篮的出现，为弯梁的悬灌开辟了一条新的途径。

第二节　连续梁移动式桁梁悬吊模架法现浇施工与设计

用移动式桁梁悬吊模架法悬臂现浇预应力混凝土连续梁的主要特点是，浇筑梁段及模板系统等施工设备均由一个置于梁顶的桁架承受，桁架再通过支架或支柱将荷载传到已完成的梁体和桥墩上。同时由于桁架把已完成梁体与悬浇施工部分连通，材料和设备可由桥上直接运至现浇点。

移动式桁架一般可根据跨度及荷载要求，用万能杆件或其他装配式杆件拼装而成，设备杆件易取并较经济，若是中小跨的长桥或桥群，经济比较合算时也可设计专用的设备，则其功能较易实现，施工会更方便。

一、移动式桁梁悬吊模架施工的适用范围

据经济技术分析比较和施工经验，移动式桁梁悬吊模架法的适用桥跨约为 40～150m，经济跨径为 70～90m。对于多跨长桥，由于设备的周转次数增多，经济效益较好，而且可能设计专用的桁梁，施工必然方便和更加适用。相对于挂篮悬臂浇筑法来说，由于其桁梁可支承于墩顶梁上，故可减小主梁悬浇时的弯矩和剪力，改善桥墩受力状况，一方面节省桥梁主体结构的材料用量并方便设计，另一方面可加大悬臂施工时的节段长度，一般分段长度可达 10m 左右，因而减少了设备周转循环次数，可较大程度地加快施工进度。

此外，由于受力桁架除可沿桥纵向移动外，还可沿桥横向移动，比较适用于一定曲率的曲线桥的悬臂灌注。

二、移动式桁梁悬吊模架法悬浇施工设备

移动式桁梁悬吊模架的主要设备有桁架、支架(支柱)、吊挂模板系统、走行系统等。

1. 桁架

桁梁是悬吊模架法施工的主要承力结构，其首先应根据桥梁的跨度、分段悬浇长度及重力等设计，同时还应满足吊挂模板的承力连接及移动需要。对孔跨数量不多的桥梁，桁梁应尽可能地利用常备式杆件组拼，对多跨长桥则可考虑设计专用桁梁以方便施工。桁梁的受力计算除应满足强度要求外，对其刚度及总体稳定性亦应给予足够重视，以免因施工中挠度过大影响

使用以及施工质量。

2. 支架(支柱)

支架上部一般与梁应固结,下部一般能沿已成梁体滑移或滚行。若采用中间支柱时,则其上部只要能为桁梁提供稳定的支承即可,下部可置放于已成梁顶,也可根据需要设行走设施。

3. 吊挂模板系统

吊挂模板系统可根据情况做成简易和专用两种形式。

(1)简易吊挂模板系统

如图 4-2-23 所示,简易吊挂模板系统一般由底模平台、钢吊带、支撑架、顶梁、调整千斤顶等组成。其可根据梁段高度调整,一般用现行的 IV 级冷拉钢筋及型钢等即可加工制成。

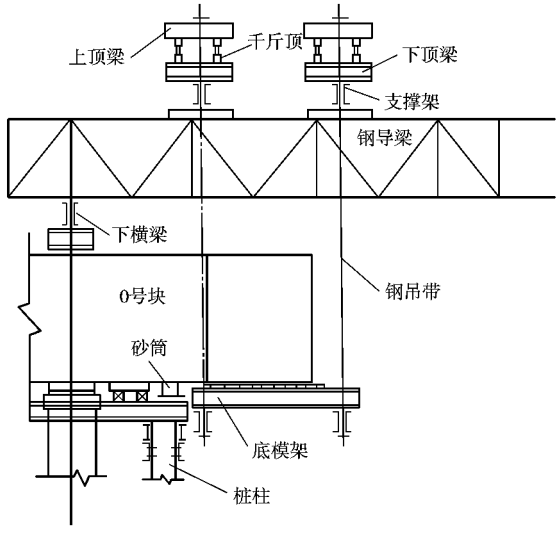


图 4-2-23 简易吊挂模板系统

(2)专用吊挂模板系统

如图 4-2-24 所示,主桁梁为三角形结构,在其上设横截面也为桁架式的承力架,其下端向两侧伸出一个型钢制作的梁,用以支承吊杆,吊杆下部则与箱梁翼缘板下的桁架式支承相连,承受其传来的荷载。底模亦为一个桁架结构,其一端与侧模桁架为固定铰连接,另一端为可拆卸的铰轴,当一段梁施工完毕后,取掉可拆卸的铰轴,使底模桁架绕固定铰旋转下落,即可将整

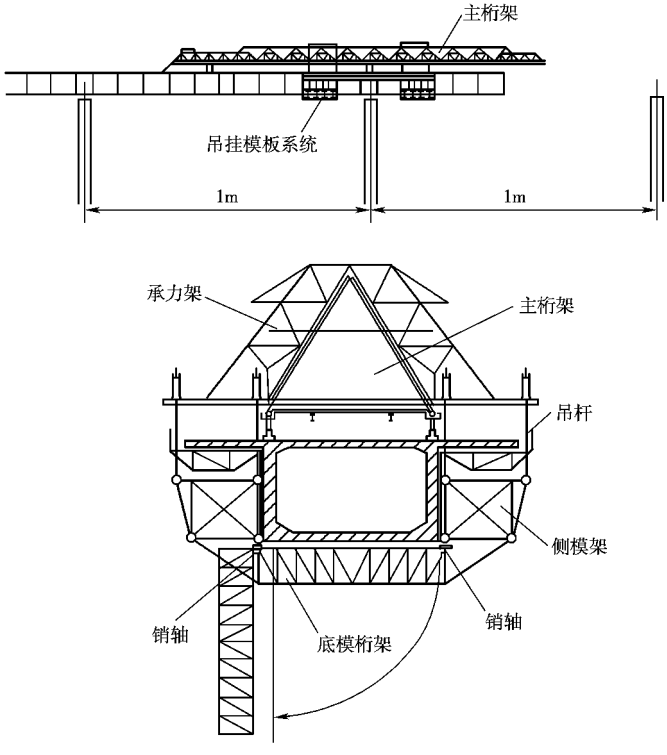


图 4-2-24 专用吊挂模板系统

个吊挂模板系统前移至待灌段作业。

4. 走行系统

走行系统可分为滑动走行系统及滚动走行系统两种。

(1)滑动走行系统

如图 4-2-25 所示，在已成梁段上设置型钢下滑道，涂黄油或贴不锈钢板。上滑道可用型钢直接扣放在下滑道上，或加放聚氯乙烯四氟板，对荷重不是很大的情况下，可用型钢上下滑道中间涂黄油实现走行。

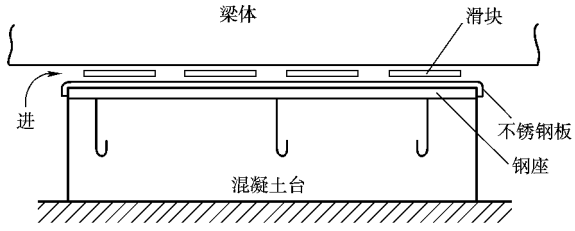


图 4-2-25　滑道示意图

(2)滚动走行系统

滚动走行系统的结构如图 4-2-26 所示。施工时，应根据桁梁荷重确定必需的滚轴数量，以满足容许接触压应力的要求。另外，作业时随时将尾部滚出的滚轴连续放至滚道前端，以保证连续滚动。上滚道的出入口应设置成船形，以方便滚轴进出。

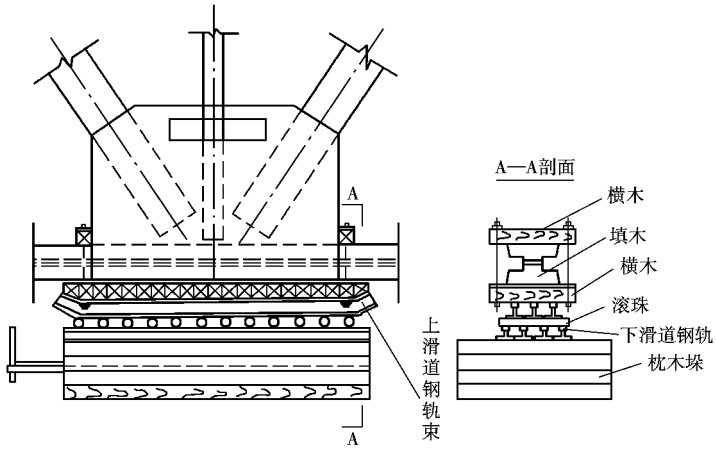


图 4-2-26　滚动走行系统示意图

采用滚动走行方式时应注意，桁梁到位后，一般应用千斤顶将桁梁顶起使其略微脱离接触，并用型钢或钢楔块塞死，以使结构稳定并避免浇筑梁段时滚轴或滚轮接触应力超限。

在设置桁梁纵、横向走行滑移设施或吊挂模板系统的前移设施时，可依实际情况根据选用适宜的方法，并配以千斤顶、滑轮组为动力来实现走行或滑移。

三、移动式桁梁悬吊模架法的施工工艺程序

对移动式桁梁悬吊模架法纵横移悬浇施工用以下两实例予以介绍。

1. 横移式桁梁悬吊模架法的施工

(1)工程实例概况

上海扬盛河桥是连接富锦路与蕴川路、跨越扬盛河的一座公路桥，位于半径 $R=300\text{m}$ 的圆曲线上，上部结构由 35＋50＋35(m)一联的等高度预应力混凝土连续梁和一孔空心板梁组成，桥宽 17.6m，为纵、横双向预应力结构。如图 4-2-27 所示。

由于主梁为等高度箱梁，施工又不允许中断主跨河道通航，故中孔采用可移动的桁梁悬吊

模架法逐段对称施工，桁梁采用 50m 拆装式钢桁梁拼成。边孔在落地膺架上施工。

主梁施工程序为：先在主跨墩顶浇筑 0 号块箱梁，然后在两个零号块顶面安装拆装式钢桁梁作为主桁梁，并以其上弦为滑动支点，对称地安装悬吊模架，进行立模、绑筋、悬臂浇筑混凝土和预应力张拉等作业，每段梁悬灌结束后，横移一次主桁梁并纵移一次悬吊模架。使悬浇段符合设计线形。与此同时，在膺架上分段灌注与主梁对称的梁段，最后进行边、中孔合龙段。其具体工艺流程如图 4-2-28 所示。

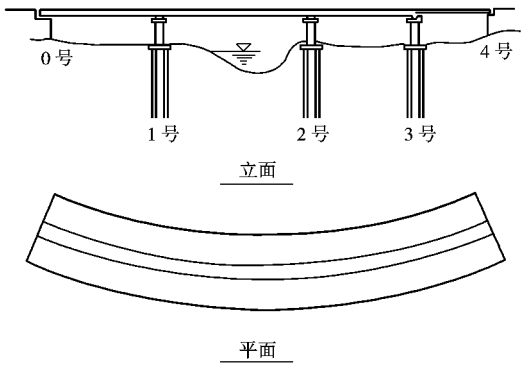


图 4-2-27　扬盛河桥布置图

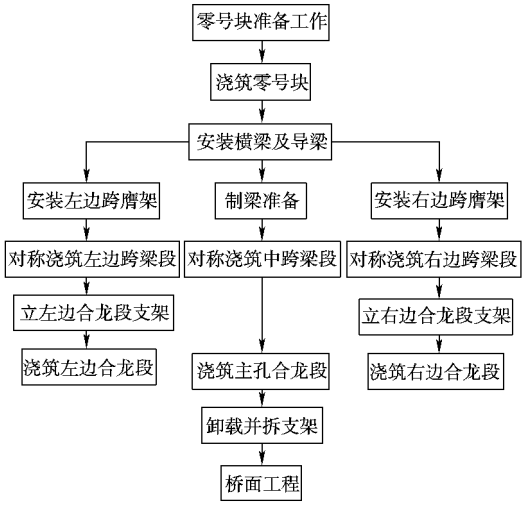


图 4-2-28　扬盛河桥主梁施工工艺程序图

(2)主桁梁及横移机构设置

如图 4-2-29 所示，0 号块混凝土浇筑后，在其顶面布置垫梁和下横梁。然后将主桁梁在跨河便桥上组拼，在主桁梁两端设置龙门吊机提升主桁梁就位。为实现主桁梁的横移，在两主墩身预埋托架，其上放置工字钢作为滑道，主桁梁通过支架置放在滑道上。

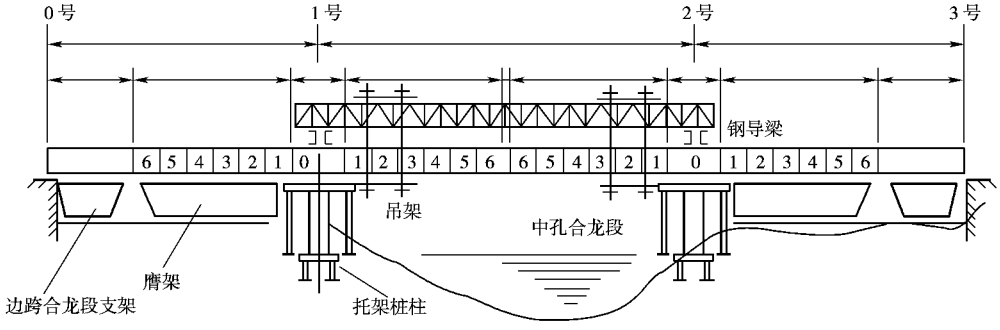


图 4-2-29　简易悬吊模板施工布置图

(3)简易悬吊模架的设置

模架由纵横梁组成的底模平台、4 根钢吊带、支撑架及千斤顶调整装置等组成，模架以箱梁节段自重、模板、施工机具及人员等荷载作受力检算，考虑桁梁在悬灌过程中挠度的变化，设置调整千斤顶随时予以调整，以满足设计要求。

(4)设置预拱度应考虑的几个主要因素

①梁段自重产生的下挠度。

②预应力产生的上挠度。

③施工荷载产生的下挠度。

④吊梁受力变形产生的下挠度。

⑤混凝土收缩徐变以及后张拉预应力束使先张拉预应力束松弛而产生的下挠度。

⑥温差产生的影响。

施工前应根据设计高程并考虑以上因素，经理论分析计算确定立模高程，作为箱梁高程控制的基础。而在施工中，则应及时对每梁段的实际高程作出精确测量，并与理论立模高程比较，找出误差原因，并在下一梁段的施工中予以适当调整。

2. 纵移式桁梁悬吊模架法的施工

(1)工程实例概况

位于德国法兰克福北部的赛格达鲁(Siegtal)桥是一座12跨(1050m)长，墩身高达100m，最大跨度105m的大桥，上部结构为两个分离式的单室箱梁，每箱梁为单向三车道，桥全宽30.5m，桥面全长连续。

上部结构采用上置式桁梁模架法对称悬臂浇筑，节段长度10m，墩顶0号块又同样利用其浇筑。

(2)主桁梁布置

主桁梁用高强钢制成，并在其上弦施加预应力，以承受高拉应力，以便减小桁梁高度。桁架全长135m，以适应105m最大跨度的施工需要。桁架总重以及悬吊模架和10m长的现浇段混凝土总重达660t，桥面混凝土采用泵送，管道通过已成梁体从主桁架引至灌注段。

(3)悬吊模架结构构造

德国赛格达鲁(Siegtal)桥的悬吊模架结构为，其顶部为驮在三角形主桁梁上的桁架结构，中部的承重梁上与桁架结构连接，下吊模架，两侧模架直接吊挂在承重梁上。底部桁架则与两侧模架铰接，当灌完一个梁段后，一侧铰接松开，使底部桁架旋转下落，当模架移至待灌段时，将底部桁架拉起重新铰接，灌注下一梁段。

(4)悬吊模架法悬臂灌注箱梁的施工程序

悬吊模架法悬臂灌注箱梁的施工程序如图4-2-30所示。

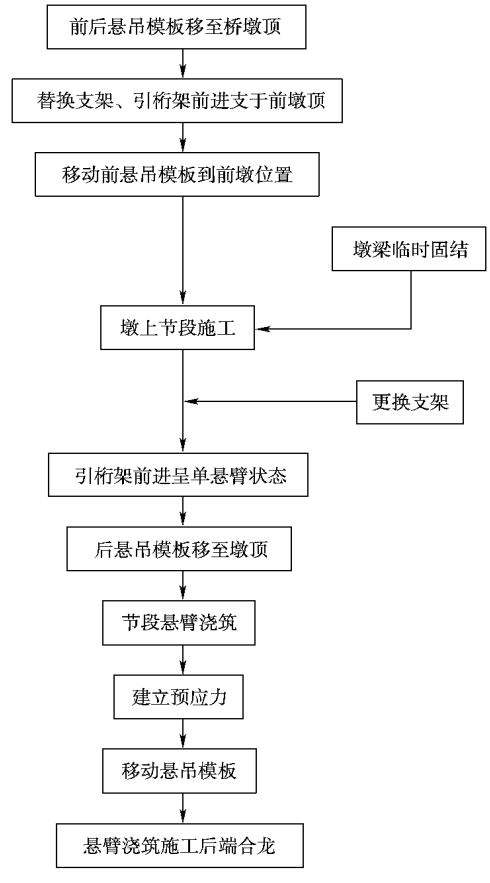


图4-2-30　悬吊模架法悬臂灌注箱梁施工程序图

第三节　分段悬臂现浇施工的其他方法

一般情况下，预应力混凝土连续梁多采用挂篮悬臂法施工，但当桥下地势较平且高度不大时，采用落地式滑移支架则可能是方便和经济的。不论采用哪种施工方法，一般应在设计时预先确定，并以确定的施工方案进行结构分析计算。但由于施工受多种因素的影响，可能出现设

计时虽确定梁部用挂篮悬臂浇筑，施工中又需改用滑移支架法施工，这就需要对梁部的受力及变形作相应的验算，必要时采取一定的措施，维持原设计的梁部受力状况及线形。

一、滑移支架法施工实例

1. 襄樊汉江长虹大桥结构概况

该桥主跨为14跨一联的预应力混凝土连续梁桥，按65＋85＋10×100＋85＋65(m)分跨，上部结构为双箱单室箱梁，三向预应力，其边跨箱梁截面形式如图4-2-31所示。

2. 施工方案变更原因

原设计确定的施工方案是，除两端边跨有约半跨用膺架现浇外，其余均由各墩用斜拉式轻型挂篮对称悬臂灌注，后因工期紧，挂篮数量不足，再制挂篮不但费用高，时间上也来不及，况且南岸边跨处于河岸西侧，地形条件也较好，故决定改用滑移支架法施工。

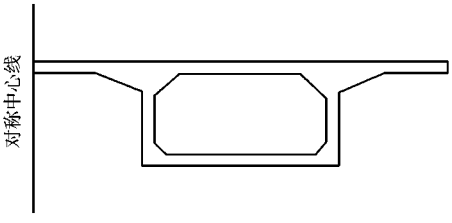


图4-2-31　湖北襄樊汉江长虹大桥箱梁横截面图

3. 滑移支架法施工

如图4-2-32所示，该桥1号墩南侧地势平坦，但地表覆盖层较软，采用4道条形混凝土基础，顶设2道钢轨形成滑道。滑移支架由万能杆件及部分型钢组成，自上而下分别为：侧模支架、底模、分配梁、万能杆件支架、滑槽等。施工过程为：将滑移支架置于欲灌箱梁节段下方，立模、绑筋并灌注混凝土，等强后张拉有关预应力束，再通过支架上的钢楔块卸载。然后用卷扬机将各箱的支架牵动，沿滑道移至下一个箱梁节段，滑移时在轨面上涂黄油以减小摩擦。

1号墩北侧因处于河堤坡面，地势不平，故采用在临时支墩上设万能杆件组拼的纵梁，并在纵梁上放置可移动的分配梁及卸载楔块的方案，每灌完一段后，用钢楔块卸载，然后将分配梁前移到下一段施工。两侧的顶板及内模支架均一端支撑在已灌段底板上，另一端支撑在分配梁顶面。

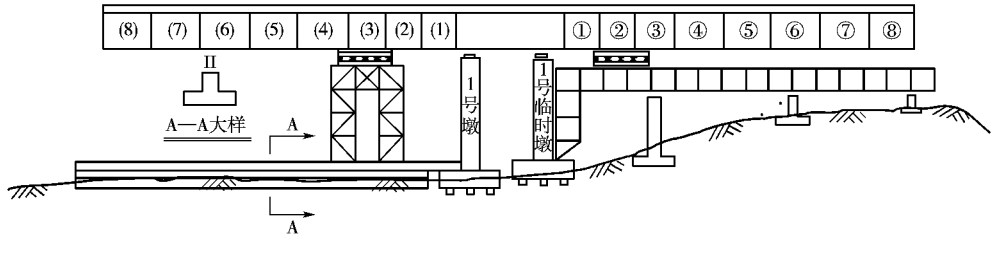


图4-2-32　简易悬吊模架施工布置图

为消除支架非弹性变形并验证基础沉降量，支架拼好后作压载试验，经用等于拟灌段混凝土重力的砝码铁压载后，测出地基沉降量约3～5mm，支架顶压载后高程降低了12～17mm(包括各铁件间隙及弹性变形)。按有关施工经验，支架及分配梁等接触面压缩量可能发生8mm，而这部分在压载时已发生。为简化施工，对后灌段仅按6～10mm预留沉降量，且拟灌段与原立模高程低约4～7mm，证明这种考虑是可以满足施工精度要求的。

二、挂篮悬灌改用滑移支架法现浇对梁部受力的影响

如上所述，箱梁施工由挂篮悬臂灌注改为滑移支架法现浇，一是梁部少了挂篮这部分荷

载，二是新灌段张拉顶锚前，存在支架所产生的冗力，为一次超静定结构。于是，一方面由于日照所形成的梁部温差会产生温度应力，另一方面，由于张拉顶锚时，新灌梁段重力部分由支架承托和未加挂篮会使预应力高强钢束在支架楔块卸载后产生一预应力增量，分析如下。

1. 冗力所产生的温度应力计算

仍以襄樊汉江长虹大桥边跨落地式滑移支架施工为例。

(1)假定

依设计所提供的数值，边跨部分箱梁截面特性值相差不大，为简化计算，假定各梁段截面特性均相同。

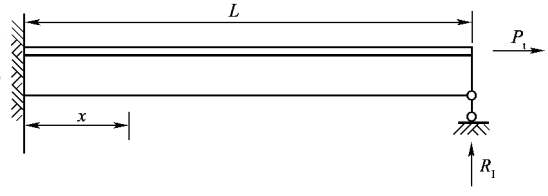


图 4-2-33　温度应力计算图示

(2)计算公式

如图 4-2-33 所示，温差所产生的温度内力为：

$$P_t = \alpha E \Delta t A_0 \tag{4-2-12}$$

式中：α——箱梁的线膨胀系数；

E——混凝土的弹性模量；

Δt——梁上翼缘与下部的日照温差；

A_0——梁上翼缘截面积。

由 P_t 单独作用产生的 R_1 方向的位移：

$$\Delta R_{1Pt} = \frac{ML^2}{2EI} = \left(e - \frac{h}{2}\right) P_t L^2 / 2EI \tag{4-2-13}$$

式中：e——截面形心至梁上翼缘的距离；

h——顶板厚度；

L——悬臂施工段长度。

支点处由单位力单独作用产生的沿 R_1 向的位移：

$$\delta_{11} = \frac{L^3}{3EI} \tag{4-2-14}$$

则支点反力为：

$$R_1 = \frac{\Delta R_{1Pt}}{\delta_{11}} = \frac{3P_t\left(e - \frac{h}{2}\right)}{2L} = \frac{3\alpha E \Delta t A_0\left(e - \frac{h}{2}\right)}{2L} \tag{4-2-15}$$

梁任一截面弯矩：

$$M_x = R_1(L - x) = \frac{3\alpha E \Delta t A_0\left(e - \frac{h}{2}\right)}{2L}(L - x) \tag{4-2-16}$$

梁任一截面下缘温度应力：

$$\sigma_x = \frac{P_t}{A} + \frac{M_x(H - e)}{I} = \alpha E \Delta t \frac{A_0}{A} + \frac{3\alpha E \Delta t A_0\left(e - \frac{h}{2}\right)}{2LI}(L - x)(H - e)$$

$$=\alpha E\Delta t\left[\frac{A_0}{A}+1.5A_0\left(e-\frac{h}{2}\right)(L-x)(H-e)/LI\right] \tag{4-2-17}$$

式中：H——梁高。

2. 由于新灌混凝土由支架承托及未加挂篮重力产生的预应力增量

(1)假定

①由 $\Delta\sigma_y$ 所产生的各项预应力损失不计，包括摩阻损失、弹性压缩损失、收缩徐变损失和钢筋松弛损失等。

②假定支点在每段梁的最前端。

(2)计算公式

如图 4-2-34 所示，令 δ_{hy} 为单位预应力单独作用产生的支点处的竖直位移；δ_{yh} 为单位支点反力单独作用时产生的预应力束锚固点的变形。

图 4-2-34　$\Delta\sigma_y$ 计算图示

$$\delta_{hy}=\delta_{yh}$$

对第一批张拉的预应力钢丝束，有

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_{y1}&=\varepsilon E\\&=\frac{R'_{h1}\times\delta_{yh1}}{L}\times E\\&=\frac{(Q_2-R'_{h1})\times\delta_{yh1}}{L}\times E\\&=\frac{[Q_2+(f_{Q1}-f_{y1})/f_{Q1}\times Q_1]\times f_{y1}\div P_1\div N_1\times E}{L}\end{aligned} \tag{4-2-18}$$

式中：Q_2——挂篮静载(MN)；

f_{Q1}——Q_1 单独作用所产生的梁端挠度(m)；

f_{y1}——第一批张拉的预应力束单独作用所产生的梁端挠度(m)；

Q_1——新灌梁段混凝土荷载(MN)；

P_1——第一批张拉的预应力束的设计张拉力(MPa)；

N_1——第一批张拉的预应力钢丝的束数；

E——预应力高强钢丝的弹性模量；

L——新灌梁段至支座的距离(m)；

R'_{h1}——第一批张拉的预应力束张拉后顶锚前的保留支承力(MN)。

对第二批张拉的预应力钢丝束，只要考虑 Q_1 的部分或全部已为第一批张拉的预应力钢丝束所承托这个因素，同理可计算 $\Delta\sigma_{y2}$。

则对每批张拉的预应力束，有

$$U=\frac{\Delta\sigma_{yi}}{\sigma_{yi}} \tag{4-2-19}$$

式中：U——钢丝束的预应力增量与原设计值的比率；

σ_{yi}——每批张拉的钢丝的设计张拉力。

以上计算可用计算机编程进行。

三、计算结果综合分析

1. 技术可行性分析

(1)温度应力对结构的影响及对策

由计算得知，由于原斜拉式轻型挂篮悬灌改用滑移支架法施工，所引起的梁下翼缘的温度应力最大值为 1.67MPa，用斜拉式轻型挂篮悬灌方案计算得梁下翼缘的最大压应力原为 $\sigma=8.01$MPa，两者叠加为：$\sum\sigma=8.01-1.67=6.34$MPa，只是使梁下翼缘原计算的压应力值有所减小。其余各截面由于温度应力的影响一般也不会出现拉应力，况且此温度应力在悬灌完成后体系转换前滑移支架拆除后即已自行消失，不会对合龙后的结构内力产生影响。若原悬灌梁段改用滑移支架施工时在日照温差不大的季节或阴天，则此项影响很小，一般可忽略。若在日照温差较大时施工，可通过在梁顶覆盖草袋并浇水降温的方法减小或消除，以免新灌段与先灌段间产生裂缝。

(2)由于冗力及未加挂篮重力所产生的影响

由计算得知，冗力最大值仅为设计张拉力的 7‰，若采用重型挂篮，假定其重 0.823MN，同理可计算得 $U_{max}=7.76‰$，其与设计时预应力管道的摩阻系数 μ 和实际的 μ 值所可能产生的误差相比也会小，可忽略不计。因为即使是张拉油泵的油表使用精密油表，其最小刻度也只能代表一束钢丝束应力的 15‰，而按计算值，$U_{max}=7.76‰$，只能占其半个刻度，一般操作时不易控制。若计算的值较大时，也完全可以在张拉力中予以调整，以使结构完全保持原设计受力状况。

另外，由于 U_{max} 很小，其对梁部挠度的影响也很小，不必再行分析。

2. 效益分析

(1)经济效益比较

以本桥为例，斜拉式轻型挂篮每套每墩使用一次的摊销费用约为 12.8 万元，而采用滑移支架所需的万能杆件、型钢及基础混凝土的摊销费用约为 3.2 万元，后者约为前者的四分之一。另外，滑移支架法施工仅需一次到位，安、拆也方便，工费也较斜拉式轻型挂篮为低。

(2)社会效益分析

采用滑移支架法施工，多使用工地常备式杆件，方便、易得，在挂篮数量不足的情况下，对加快工期明显有利。此外，因其施工操作相当于落地式膺架，施工安全也易得到保障。

四、结　　论

由计算及分析可知，在一定条件下，预应力混凝土连续梁由挂篮悬臂灌注法改为滑移支架法施工在技术、经济效益及社会效益上都是可行的。一般来说，设计时就应根据具体情况确定适宜的施工方法，而施工中一旦需由挂篮悬灌法改为滑移支架法施工，只需依据改变施工方法后对梁部受力的影响大小，在张拉预应力钢丝束时予以调整，若影响很小，也可忽略不计。

此外，由于预应力混凝土刚构及悬臂梁等桥形结构悬臂施工与上述情况类似，以上结论对其同样适用。

第四节　钢-混组合连续刚构桥施工

如前所述，由于预应力混凝土连续梁桥和连续刚构桥的结构自重大，一般来说，超过

300 m跨度从经济和技术等方面就显得不够合理，施工技术难度也会增大，因此，为了充分利用混凝土和钢结构各自的材料特性，即将可能引起结构较大弯矩的跨中区域的混凝土用钢结构代替，就产生了钢-混组合连续结构。

以下结合重庆石板坡大桥复线桥对钢-混组合连续结构施工予以介绍。

一、重庆石板坡大桥复线桥的结构和施工特点

重庆石板坡长江大桥加宽改造工程采用在原桥上游平行新建一座桥梁的方案实施。新建桥梁除取消 6 号墩(5 号墩与 7 号墩间一跨跨过主河槽)外，其余墩位与原桥墩位对应。桥梁跨径组成为：86.5＋4×138＋330＋132.5(m)。桥梁结构采用连续梁与连续刚构混合连续体系，其中(自渝中区至南岸区)，①、②墩为墩梁分离(简单支承)，③、④、⑤、⑦墩为墩梁固结。

桥梁主跨(⑤、⑦墩间)采用钢-预应力混凝土混合形式，即中部 108 m 采用钢箱梁，以便减轻自重，减小因混凝土收缩徐变对结构后期变形的影响，改善结构受力，缩短建设工期。该跨其余部分以及其他跨采用三向预应力混凝土箱梁。桥形布置如图 4-2-35 所示。

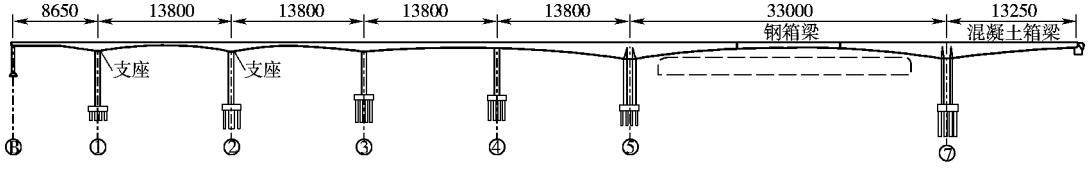


图 4-2-35　石板坡长江大桥桥型布置图(尺寸单位：cm)

1. 桥型独特

重庆石板坡长江大桥加宽改造工程采用的连续梁与连续刚构混合形式，较一般连续体系桥有诸多不同：

(1)桥梁采用连续梁与连续刚构混合体系，刚构主跨达 330 m，且主跨采用钢箱梁-混凝土箱梁混合形式，其跨径居世界同类型桥梁之首。

(2)连续跨数 7 跨、连续长度 1101 m，主梁最大梁高 16m，连续跨数、连续长度和梁高在连续刚构桥中较少。

(3)由于受原桥条件限制，主结构边跨(132.5m)与主跨(330m)的比例小；主结构墩身高度相对较小。

(4)330m 主跨主梁采用钢-混凝土混合结构，属世界首次，主跨中央钢箱 103 m(不含两端各2.5m的接头过渡段钢箱)。

(5)由于其超静定次数较多，温度变化、混凝土收缩徐变等复杂因素对内力的影响大，运营状态结构受力与设计状态结构受力之间可能存在较大差别，所以对设计要求高。

2. 施工难度大

(1)0 号块、高度在 12m 以上的混凝土梁段施工挂篮构造、行走、混凝土浇筑等难度大。

(2)4 号墩左右的支架现浇段施工难度大。

(3)主跨中部 103m 钢箱梁，质量达 1400t，制造、运输、整体吊装难度大。

(4)钢-混凝土接头过程复杂(在混凝土箱梁设预埋件—安装钢接头过渡段—吊装钢箱梁—实施接头)，施工难度大，精度要求高。

(5)成桥过程中结构体系转换次数多，工序复杂，因合龙温度难以完全满足设计要求而可能实施强迫合龙。

(6)桥梁施工过程结构安全与成桥内力和线形状态控制难度大。

(7)桥面无调平层,铺装(厚 7.5cm)一次形成,对梁顶平整度要求高。

3. 施工过程控制技术要求高

(1)主跨 330m,采用钢-混凝土混合结构,建设难度大;桥梁连续跨数达到 7 跨,体系转换多,结构受力、线形控制难度大。

(2)桥梁设计为 7 孔连续且连续长度达 1101m 的平坡桥,成桥时的线形与运营一定年限(一般为混凝土收缩徐变终止的年限)后的线形差异明显,实现最终设计目标的难度大,对线形控制的要求非常高。

(3)合龙温度很难保证在设计要求的范围内,强迫合龙难以避免,但强迫合龙措施复杂,其状态控制难度大。

(4)施工控制所需的混凝土材料性能及其变异、预应力信息、温度等参数识别难度大;混凝土收缩徐变、温度变化等复杂因素对结构的影响分析,如施工过程结构状态分析、误差分析、预测、成桥结构状态预测分析等难度大。

(5)因主结构主跨中部 108 m 为预制钢箱梁,不便实施强迫合龙,所以,合龙温度需严格控制,预制钢箱梁两端的混凝土悬臂端高程精度要求高。

(6)4 号墩左右的现浇段支架高,其变形、稳定控制难度大。

(7)桥面无调平层,裸梁顶平整度及铺装恒载控制难度大。

二、需研究解决的主要技术问题

1. 一般预应力连续刚构桥存在的问题

(1)在施工过程中及成桥后结构可能发生的开裂(腹板、底板等)。

(2)由于其超静定次数较多,温度对内力的影响很大,如何减小温度内力?

(3)结构后期变形可能过大,影响受力和线形。

2. 该桥需研究解决的技术问题

(1)设计理论与方法研究——解决钢混组合连续刚构桥总体设计原理与设计理论、混凝土主悬以及钢挂孔设计方法问题。

(2)高性能混凝土研究——解决如何保证钢混组合连续刚构桥混凝土箱梁用混凝土的良好工作性能、耐久性能和变形性能。

(3)混凝土箱梁结构行为试验研究——解决大吨位预应力混凝土锚下受力行为、悬臂单箱单室预应力混凝土框架效应的正确认识问题,从而为建立合理的预应力体系奠定基础。

(4)钢混接头疲劳行为与承载能力试验研究——解决钢混接头整体结构空间受力情况、钢混接头疲劳及承载力的正确认识问题,从而为合理设计钢混接头提供依据。

(5)108m 钢箱梁施工工艺研究——解决钢箱梁制造、运输方案;整体提升精确合龙技术措施问题。

(6)混凝土悬臂箱梁节段施工工艺研究——解决混凝土配合比、高大混凝土梁的浇筑及养生、精确预应力张拉、真空灌浆等技术问题,以确保其施工质量。

(7)施工控制实施研究——解决多跨钢混连续梁与连续刚构组合桥梁施工控制方法、后期变形对策、钢混接头空间状态精确控制、裸梁顶面平整度及线形控制等技术问题。

三、施 工 控 制

该桥采用悬臂施工,由于连续刚构桥在施工过程中的已成结构(悬臂梁段)几何状态(平

面、立面位置)难以事后调整,所以,施工控制主要通过事前预测和事中控制来实现,主要体现在以下方面:施工控制模拟结构分析,结构变形与应力监测、预警、施工误差分析,后续施工状态预测、调整,梁段施工立模高程提供、合龙方案制定等。总体上,以随机最优控制为基础进行本座多跨连续梁与连续刚构混合桥梁的施工过程控制。

1. 混凝土徐变计算模式的选取

(1)徐变计算模式与桥梁后期变形

预应力混凝土连续刚构桥一般在 100～200m 跨径中广泛采用。总结预应力混凝土连续刚构桥设计、施工及使用情况,还有许多问题需要研究、解决,其中,桥梁后期开裂和变形(下挠)尤为突出,其原因很多,但一般认为混凝土徐变预计不足是主要因素。

(2)桥规关于徐变计算模式的采用

该桥施工控制理论分析中采用现行桥规推荐的 CEB-FIP 1990 徐变模式进行计算,同时采用《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 023—85)《附录四》推荐的 CEB-FIP 1978 徐变模式进行计算以资对比。对比分析发现,在相同时间段内,用 CEB-FIP 1978 徐变模式计算出的后期徐变变形反而比用 CEB-FIP 1990 徐变模式计算出的后期徐变变形大。两种模式的计算结果哪一种更准确难以下定论,但就目前连续刚构桥后期徐变变形较大的现象普遍来讲,采用比 CEB-FIP 1978 模式计算结果更小的徐变影响值不尽合理,所以,该桥在 CEB-FIP 1990、CEB-FIP 1978 模式计算基础上,结合混凝土的实际情况和已有经验进行徐变影响综合分析。

2. 桥梁三维线形控制

(1)桥面竖向线形控制

桥面竖向线形控制目标是实现桥梁的高精度合龙,同时保证桥梁运营多年后,即混凝土收缩、徐变基本终止后,桥面线形达到理想设计状态。石板坡大桥没计为平坡桥,桥面铺装厚度仅为 7.5 cm,且无调平层,实现最终设计目标的难度大,对线形控制的要求非常高。

该桥由节段悬臂浇筑施工＋部分支架现浇＋部分整体提升安装形成,从开工到成桥要经过包括多次体系转换的复杂过程。竖向变形控制就是根据施工监测所得的结构参数真实值进行施工阶段结构受力与变形计算(图 4-2-36),在施工过程中根据结构应力监测结果,对桥梁施工过程安全做出评价与预警;根据变形监测的成果对误差进行分析、预测和对下一阶段立模高程进行调整,确定出每个悬浇节段的立模高程,以此来保证施工沿着预定轨道(能达到建设目标的施工路径)进行,从而保证主梁合龙段两悬臂端高程的相对偏差不大于规定值以及合龙后桥面线形和结构内力符合设计要求。

(2)桥面横断面线形控制

箱梁断面变形分析的原因主要是因为箱梁顶板由于自重、横向预应力张拉及混凝土的收缩、徐变等影响,导致翼缘板边缘上翘,中心下沉,从而使桥面横坡偏离设计值。

该桥箱梁顶板悬臂长度为 5 m,其变形较大,对横坡影响较为显著,因此在施工控制计算中,对箱梁断面的局部变形进行了分析计算。

根据箱梁横向预应力间距,取箱梁断面的局部模型宽度为 50cm,采用空间实体单元模型箱梁结构,采用空间梁单元模型预应力束,模型中偏于保守地忽略普通钢筋的作用。

模型计算分为考虑徐变影响和不考虑徐变影响两种情况:当不考虑徐变影响时,横向预应力张拉完成后,翼缘板边缘上翘 8.4mm,中心下沉 0.3 mm;当考虑 10 年徐变影响时,横向预应力张拉完成后,翼缘板边缘上翘 22 mm,中心下沉 2.2 mm。在自重荷载及预应力荷载作用

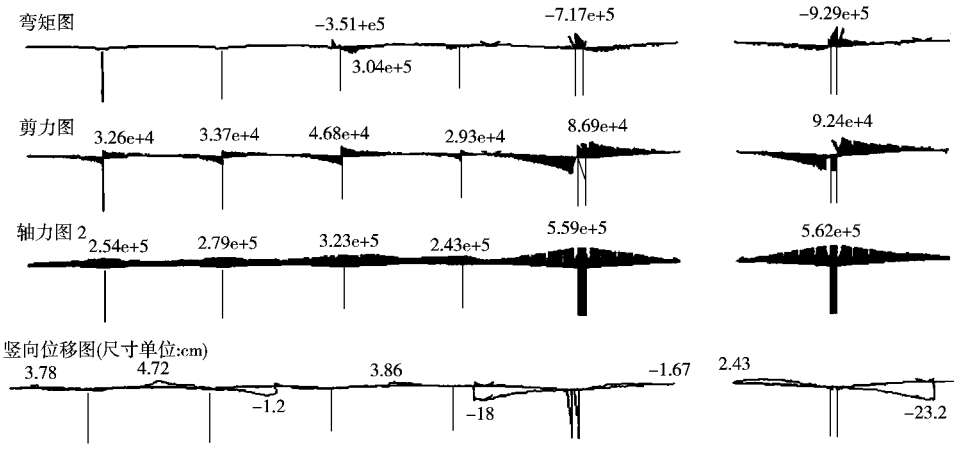


图 4-2-36　钢箱梁吊装前内力、变形

下，箱梁顶板变形图如图 4-2-37、图 4-2-38 所示。

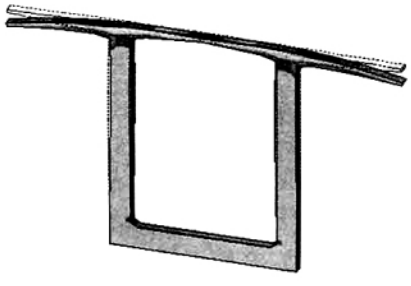


图 4-2-37　自重作用变形图

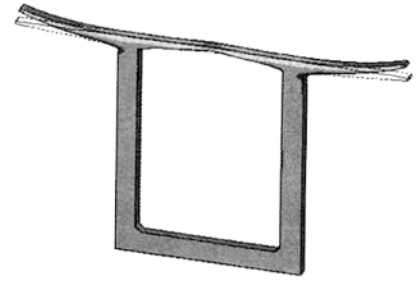


图 4-2-38　预应力作用变形图

当考虑箱梁顶板变形因素时，立模高程计算式如下：

$$Lm_{ij}=S_i+\delta_{ij}$$

式中：Lm_{ij}——考虑顶板变形修正后第 i 节段施工立模高程，j 表示箱梁顶板横向位置，分别为顶板边线测点、腹板测点及桥中线测点；

S_i——未考虑横向变形时第 i 节段施工立模高程；

δ_{ij}——第 i 节段顶板横向变形修正值。

(3)桥梁轴向变形控制

在预应力张拉、混凝土收缩、徐变以及温度荷载作用下，都会使主梁沿轴向发生变形。对于连续长度不大的桥梁，其轴向变形相对较小，一般可以忽略不计。而该桥设计为 7 孔连续且连续长度达到 1103.5m，轴向变形显著，如处理不当将对支座安装、钢箱梁吊装及结构内力等方面造成不利影响，因此必须对桥梁的轴向变形进行控制。当不考虑温度荷载作用时，桥梁建成后 10 年后的预计变形如图 4-2-39 所示。

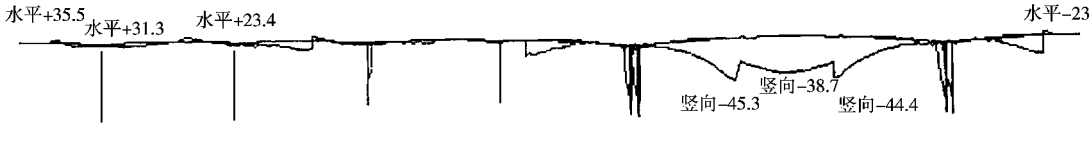


图 4-2-39　主梁轴向及竖向变形图

当考虑主梁轴向变形影响时，对于支座的安装，采取设置预偏量 Δ 的方式，使支座在全桥合龙并且轴向变形基本结束后，支座顶、底板处于对中位置。第 i 号墩(台)支座安装预偏量 Δ_i 的计算公式如下式：

$$\Delta_i = \delta_i + \delta_i(t - t_0)$$

式中：δ_i——第 i 号墩(台)支座由于预应力及混凝土收缩、徐变所产生的轴向变位；

$\delta_i(t-t_0)$——在温度荷载作用下主梁产生的轴向变位，其中$(t-t_0)$为支座实际安装温度与桥梁标定温度的差值。

3. 施工中的温度变形控制

在主梁施工过程中，由于外界温度的不断变化，将会使主梁产生温度变形和温度内力。温度参数是一个复杂的随机变量，它与桥梁所处的地理位置、自然条件及气候条件等因素密切相关。温度变化包括：季节温差、昼夜温差及日照温差等，都会使主梁产生轴向变形和竖向挠曲。在节段施工过程中，不可避免地会出现实际温度与设计标定温度存在一定差异。因此，针对各个施工阶段进行了温度变化对结构变形及受力的敏感性分析，得到了温度变化与结构变形的关系曲线，从而可以在不影响施工进度的情况下，根据温度变化幅度进行插值计算，对结构的变形进行修正，提供准确的立模高程值。

具体方法是首先设定全年平均温度 T_0 为基准温度，在主梁第 i 节段施工中，计算桥面高程与温度变化的关系曲线：$\Delta(T-T_0)$。假定立模温度为 T_i，则可得到高程修正值 ΔT_i：

$$\Delta T_i = \Delta(T_i - T_0)$$

此时便可得到考虑温度变形影响的立模高程：

$$Lm_{ij} = S_i + \Delta T_i$$

式中：S_i——未考虑温度变形影响的立模高程计算值，其他符号意义同前。

4. 主跨合龙控制

一般连续刚构桥合龙通过浇筑合龙段混凝土来完成，即湿接头合龙。本桥主跨采用钢-混凝土混合形式，合龙系通过现场连接锚固于混凝土梁端的钢构件与 103 m 钢箱来完成。两者相比较，后者的精度要求高得多。本桥主跨合龙工序包括：在混凝土悬臂箱梁端设置预埋件→吊装接头过渡段钢箱→起吊 103 钢箱梁→实施钢箱梁与过渡段的固结。

(1)混凝土箱梁端预埋件设置

一方面，混凝土箱梁端预埋件可靠性关系到钢混接头乃至全桥结构的可靠性；另一方面，混凝土箱梁端预埋件空间位置直接影响过渡段钢箱的空间位置，而过渡段钢箱的空间位置又对是否能顺利合龙起决定作用。由于混凝土结构特性本身的不确定性和桥梁结构体系的复杂性，混凝土箱梁端预埋件初始空间位置的准确确定非常困难，所以，除通过尽可能准确的理论分析(包括各种因素影响下的敏感性分析)外，采用非全荷载试验了解结构的变形特性，并验证理论分析结果，同时通过一定时间的高程连续观测来加以印证。

(2)过渡段钢箱安装

对于混凝土箱梁端预埋件空间位置可能存在的误差，过渡段钢箱安装是唯一一次调整误差的机会。需要经过理论计算和必要的实测来保证 103 m 钢箱吊装前的空间位置，特别是其端面方位和箱形截面竖向、横向和纵向位置。过渡段钢箱纵向位置牵涉到合龙段长度的精确性，关系到 103 m 钢箱是否能顺利安装。纵向预应力张拉、温度变化等对过渡段钢箱纵向位置影响最大，理论分析中将对纵向预应力张拉、温度变化情况进行专门识别，通过较长时间的合龙段距离连续测量，掌握其随温度变化而变化的真实情况，为正确确定过渡段钢箱纵向位置

提供保证。

(3)合龙时间

一般桥梁在极短时间内将合龙段劲性钢骨架锁定后即完成了实质上的合龙。该桥合龙相当于一般桥梁合龙段劲性钢骨架锁定,不同的是劲性钢骨架长度达到 103 m。正是由于 103 m 永久性钢箱的存在,合龙精度要求非常高,合龙锁定实施时间长,为避免合龙过程对结构产生不利影响,合龙必须在温度变化极小的时间段内进行。必要时采用二步合龙,即先将 103 m 钢箱其中一端与悬臂箱梁合龙,然后伺机进行另一端的合龙。

第五节　混凝土梁桥主要安全隐患和质量通病

一、挂篮等施工设备造成的安全隐患及注意要点

(1)挂篮吊杆断裂造成的挂篮底平台坠落事故。

某多跨连续箱梁桥,采用滑动斜拉式挂篮悬臂灌注施工,在挂篮完成一个节段,底模平台和侧模支架整体向前滑移时,由于局部机构运行不顺畅,滑移阻力增大,造成后端滑移吊杆由原设计的轴力杆变成了拉弯受力,导致 1 根吊杆断裂,引起底模平台和侧模支架坠入江中,9 人落水,其中 1 人死亡。直接经济损失 10 多万元。

注意要点:滑动斜拉式挂篮前移时主要靠轴力式吊杆悬吊支撑,在施加动力牵引滑移前,必须仔细检查滑道是否平顺,是否有障碍,避免挂篮前移时阻力过大,带动吊杆位移,产生弯矩,造成破坏。

(2)夜间悬臂施工作业由于安全栏杆和其他围护结构不符合要求而造成人员高空坠落事故。

注意要点:梁上临近作业面附近必须按照安全要求布设围栏,挂篮底平台空档必须用安全网或其他杆件形成安全的网格,避免人员或大的杆件和工具坠落。

(3)预应力锚固不牢,造成锚头滑丝导致悬臂梁段断裂或挠度过大造成工程质量事故。

注意要点:预应力锚具在使用前必须经过硬度和外观检查,符合要求标准后方能使用,避免因锚具过硬或过软,锚孔尺寸不合要求以及表面有毛刺或光洁度不够等原因造成锚固不牢。

(4)预应力管道固定不牢固,在灌注混凝土过程中受到浮力上漂,在随后张拉预应力时,产生额外的径向力,造成底板崩裂。

注意要点:预应力管道必须用井字架牢固地固定在钢筋上,在灌注混凝土时避免振捣过度。

二、连续梁和连续刚构的质量通病及注意要点

(1)挠度超过设计预想值。主要原因有:设计对混凝土收缩徐变计算和估计不足;预应力管道压浆不饱满,造成预应力钢绞线锈蚀或滑松;结构设计刚度不够。这种情况往往伴生裂缝。

(2)梁体开裂。主要原因有:腹板斜裂缝一般是腹板设计厚度不够或抗主拉应力钢筋布置不足等原因造成;顶、底板的横向裂缝一般是抗弯刚度不够,并往往与挠度增大伴生;龟裂一般是养护不周造成的,连续刚构的墩台不均匀沉降超过一定值也会造成梁体开裂。

(3)混凝土出现蜂窝麻面。一般是由于箱梁布筋较密,浇筑混凝土时振捣不仔细造成的,

多见于箱梁腹板。

(4)管道串浆。由于预应力波纹管在施工过程中被破坏或接头不严密,在灌注混凝土的过程中浆液漏进管内,造成预应力钢束无法穿行。

(5)悬臂施工挠度控制不准确,造成成桥后梁部线形与设计相差较多,为了保证行车平顺,又不得不用混凝土找平,造成恒载增大,影响结构受力。

(6)合龙段开裂。合龙时由于合龙口锁固不好,在混凝土没有形成设计受力强度前失效,造成合龙口混凝土拉裂,合龙失败。

第六节　悬臂现浇挂篮设计及施工实例

一、广东虎门大桥辅航道桥 270m 连续刚构施工用弓弦式挂篮实例

1. 挂篮的设计构思和技术方案比选

虎门大桥位于珠江出海口,桥址处经常有台风和雷雨大风,使 270m 连续刚构悬臂施工工艺的设计成为一项非常关键的任务,而悬臂施工工艺设计的关键在挂篮的设计,挂篮设计的好坏直接影响到施工进度,它是虎门大桥辅航道桥建设的一项重大技术问题,施工前对挂篮设计技术方案进行了论证和比选。

国内外挂篮正向轻型方向发展,挂篮设计主要控制指标为:挂篮的总用钢量与最大块件之比值 K_1、主桁架用钢量与最大块件重量之比值 K_2。K_1 值愈低,表示整个挂篮设计愈合理,K_2 值愈低,表示挂篮承重构件的受力愈合理,使用材料愈节省。减轻挂篮自重所采用的手段除优化结构形式之外,最重要的措施就是不设平衡重并改善滑移系统,同时改进力的传递系统。斜拉式挂篮能够自行锚固,主梁在施工时不承受混凝土荷载,从而达到减轻自重的效果,但施工不方便,施工周期长。型钢式及混合式挂篮施工方便,施工周期短,但结构自重大,造价偏高,经济效益不好。根据虎门大桥辅航道桥 270m 连续刚构设计要求,结合虎门大桥所处的地理位置,吸取各种挂篮设计施工的优点,最后选用的挂篮采用桁架结构,分步滚动行走机构,整体模板,能通过精孔螺纹钢筋传力的高程调整系统,结构简便,受力明确,自重轻,结构刚度大,移动灵活,抗风能力强,特别是横向抵抗台风的能力强,节省材料,如图 4-2-40 所示,具体设计构思如下。

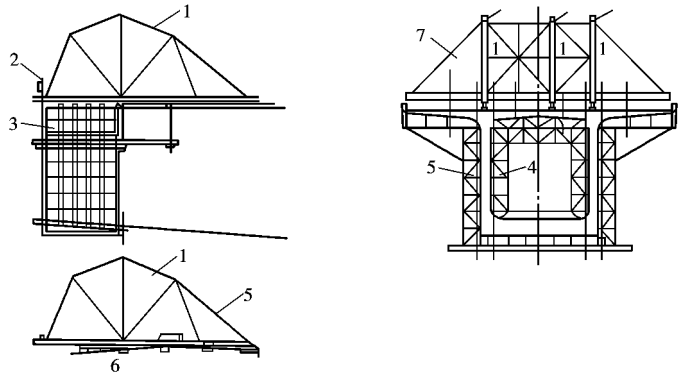


图 4-2-40　广东虎门大桥辅航道桥弓弦式挂篮示意图

1-主桁架;2-前吊杆;3-外模;4-内模;5-防护手动葫芦;6-牵引手动葫芦;7-斜撑

(1)主桁架采用万能杆件拼装成弓弦式,结构形式接近受力图。主桁架横向联向联系像老鹰的翅膀一样向两边延伸至桥面宽增加挂篮的整体稳定性,并可用来控制整个箱梁的宽度,以适应珠江口风大浪大的自然环境。

(2)采用主桁架与外模、内模分开行走,分两次行走到位的办法,这样可不设平衡重。从而大大减轻挂篮的自重。

(3)吊升系统采用 IV 级精轧螺纹钢筋,使锚固、装拆方便,调整简单。

(4)采用施加预应力,减少桁架变形,做到通过后锚梁调整前端高程。

(5)内外模板均采用 5cm 厚松木板做成,减少用钢量,减轻挂篮自重。

(6)在 1 号块使用联体挂篮,使 1 号块实现无托架施工,减轻施工用钢量,缩短施工工期。

2. 弓弦式挂篮的结构设计

(1)挂篮设计采用的主要规范

①《公路桥涵结构及木结构设计规范》(JTJ 025—86)。

②《钢结构设计手册》(GJB 17—88)。

③《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 023—85)。

④《钢结构连接节点设计手册》。

(2)主要设计指标及要求

①悬臂灌注混凝土箱梁分段长度:1 号～10 号梁段为 3m;11 号～17 号梁段为 4m;18 号～31 号梁段为 5m。

②箱梁高度变化范围 14.8～5m,设计中考虑外模、内模在高度方向上可分段。

③挂篮冲击系数按 1.2 设计。

④挂篮偏载系数按 1.2 设计。

⑤挂篮安全系数按 1.3 设计。

⑥挂篮主桁架最大挠度按 20mm 设计。

⑦挂篮底篮最大挠度按 25mm 设计。

⑧挂篮按全锚式设计,主桁后锚筋为 IV 级精轧螺纹钢筋,通过后锚设千斤顶使其在灌注混凝土过程中具有调整挠度的功能。

⑨挂篮主桁采用受力状态较好的弓弦式结构。

⑩模板系统具有调节肋板厚度及底板两端高度变化的功能。

⑪挂篮前移采用分步行走工艺。

(3)设计荷载

悬臂灌注混凝土结构最大质量为 240.5t;施工挂篮及其他设备质量为 88.7t;施工活荷载为 45kN;挂篮结构验算荷载为 3337kN。

(4)轻型弓弦式挂篮材料用量见表 4-2-2

3. 弓弦式挂篮结构特点及施工技术指标

挂篮的基本组成部分有挂篮主桁架、模型系统、吊杆及锚固系统、走行系统。其主要结构特点及施工控制指标如下所述。

轻型弓弦式挂篮材料用量表　　表 4-2-2

部位	万能杆件 (t)	钢板 (t)	型钢 (t)	2mm 厚钢板 (t)	精轧钢筋 (t)	木材 (m^3)	P_{50} 型钢轨 (t)	合计 (t)	木材 (t/m^3)

主桁架	10.73	2.9	5.43					19.06	
外模		2.93	15.8	3.25		10.4		27.18	0.5
内模		0.89	6.92	2.56		8.3		14.52	0.5
底模		0.83	7.6	1.74		2.1		11.22	0.5
滑道		9.31			2.04	11.41			
锚固	0.06	0.3	3.57		1.44			5.31	
合计	10.73	7.91	48.63	7.58	3.48	32.21	2.04	88.7	1.5

(1)挂篮主桁结构。主桁结构设计形状似弓弦,接近实际受力图,主桁片数为3片,其中2片为承力桁架,中片为利用常备万能杆件使结构稳定构造桁片。

主桁结构设计轻巧,挂篮主桁架重力与块件重力之比为0.08,这是此挂篮结构的重要特点。

主桁架横向联系利用常备万能杆件连接,外形似老鹰,另外有杆件延伸到桥面两边,增加整个挂篮的横向刚度和稳定性,抵抗珠江口可能出现的台风和雷雨大风对挂篮的影响。

在施工1号段时使用联体挂篮,使1号段实现无托架施工,节省大量周围材料,大大缩短工期。在联体挂篮主桁解体时改变了主桁解体工作量大、时间长的传统方法。主桁采用三点连接,安拆方便,简单省时。

(2)吊杆及锚固系统。挂篮前吊杆、后锚杆及底篮后锚点均采用Ⅳ级ϕ32精轧螺纹钢筋,考虑肋板自重荷载较大,底模后部横梁锚因吊杆预应力,可用2台160kN千斤顶简便施加。内外模滑道后锚点预应力,可用手动千斤顶施加,以保证分段处混凝土接碴平顺。

(3)走行系统。主桁及外模走行:在2片主承力桁架下面设置2根43kg/m的钢轨,枕木采用220×160×500(cm^3)短枕木,支承点处为同尺寸的硬杂木。主桁前移利用倒链牵引前移,两边同时缓进,移动时设置后拉防护倒链。另外,利用箱梁本身的竖向预应力钢筋作锚固钢筋,用反扣将主桁架下弦梁在带滚轴的横梁上,主桁架整个前移过程中均被反扣在竖向预应力钢筋上,以增加主桁前移的防倾能力。

内模走行:内模模型上设有滚动轴承,滚动轴承带着内模沿滑道滑出。

(4)模板系统。模板设计考虑箱梁高度变化较大,采用沿高度方向分段式模板,内力模板均采用5cm厚红松木钉2mm薄钢板。底模纵梁前端挑出几根铺设木板作工作平台。

该挂篮结构轻巧,整个挂篮总质量88.7t,而最大悬臂灌注质量240.5t,两者之比为0.37。

二、黄石长江公路大桥施工用菱形挂篮实例

1. 黄石长江公路大桥主桥箱梁概况

黄石长江公路大桥是国家"八五"期间交通部重点工程项目,全长2580.008m,其中主桥为五跨连续刚构,跨径布置为162.5m+3×245m+162.5m,全长1060m。箱梁为单箱单室断面,顶板宽19.6m,底板宽10m,梁底下缘按二次抛物线变化,根部最大梁高13m,跨中梁高4.1m。一个"T"分32对箱梁块段,分段长分别为2.5m、3.5m、4.5m,梁段最大质量为253t。

该桥结构设计对挂篮施工有三条要求:第一,挂篮承载力不小于265t,挂篮自重及全部施工荷载控制在135t以内;第二,各梁段最好采用一次浇筑混凝土,在有困难的情况下可采用二次浇筑;第三,各悬臂施工梁段,无论在浇筑或挂篮移动、拆除阶段,均要求保持平衡施工。挂篮设计主要困难为:梁段自重大,挂篮自重要求轻,高梁全断面一次浇筑等问题。

2. 菱形挂篮设计总体构思

根据上述要求，结合国内挂篮施工现有水平，需开发一种新型的轻型挂篮以满足特大跨径桥梁的施工，设计注重整体功能，不片面追求轻型指标，总体构思体现在下面五个方面。

(1)减轻挂篮自重途径

①选用一种受力合理、安全可靠的轻型结构作为挂篮承重主桁。

②挂篮用材立足国内生产的高强轻质钢材，并便于加工。

③挂篮前移时尾部充分利用箱梁竖向预应力筋平衡倾覆力矩以取消配重，从而减轻自重。

(2)缩短挂篮施工周期

①挂篮设计考虑各梁全断面一次浇筑。

②挂篮行走、模板升降等全部采用液压装置、电气集中控制，靠机械化和自动化来提高生产效率和降低工人劳动强度。

③底篮及模板系统采用垂直悬吊在主桁悬臂端，挂篮行走时，底篮、内外模同步就位，尽量减少工序，缩短施工周期。

(3)保证悬浇混凝土质量

模板设计注重混凝土外观质量，以刚度控制设计，采用新型材料制作模板，既减轻重力又坚固耐用，且满足 32 对梁段使用不需要更换和修补。制订箱梁施工实施细则，严格规范保持平衡施工及限制施工荷载的措施，保证箱梁施工安全和质量。

(4)改善施工条件和环境

设计挂篮时考虑所处位置箱梁面有宽敞的作业空间，便于放置各种机具和操作人员往返；在挂篮主桁上方设置遮阳雨棚，改善工人作业环境。

(5)考虑通用性

对挂篮结构适当处理以适应各种跨径和不同宽度的各类箱梁施工。

3. 菱形挂篮总体构造

围绕总体构思进行结构设计，挂篮主要技术参数如下：

悬浇箱梁最大质量：265t；

箱梁最大分段长度：4.5m；

箱梁高度变化：4.1～13.0m；

挂篮行走方式：自行(液压油缸顶推前移)；

提升模板方式：电气控制液压千斤顶提升；

挂篮总重：104t；

挂篮主桁最大挠度：20mm；

底篮最大挠度；＜25mm；

工作纵坡：≤3%。

本挂篮主要由三个系统组成，即主桁承重系统、底篮和模板系统、液压电气系统。0 号梁段挂篮总体布置如图 4-2-41 所示。

(1)挂篮主桁承重系统

挂篮主桁承重系统包括主桁与前后横梁、行走装置、锚固装置、悬吊分配梁和遮阳雨棚等。

①主桁及前后横梁：由两片外型呈菱形的桁片在其横向设置前后横梁组成一空间桁架，并在前后横梁设上下两层平面联结杆件，主桁杆件采用 H 型钢(H250×250×9×14/16Mn)与两块钢板组焊成抗扭性能良好的箱形截面，H 型钢也可用钢板焊接，横梁采用焊接薄壁方钢

管(B160×5/16Mn)组成平面桁架。考虑通用性，将前后横梁分别设计成三个单元组拼成一整体，根据不同桥宽仅改变中间单元长度而其余杆件不变，横梁分段接头用高强螺栓(M22/8.8级)连接。由于挂篮属于多次周转设备，要求能快速装拆，因此主桁节点采用销子(Φ100/30CrMnTi)连接，平联则采用普通螺栓连接。这种结构达到了使挂篮重力减轻的目的，且杆件布置合理、受力均匀，较好地发挥材料特性，并提供了宽广的作业净空。

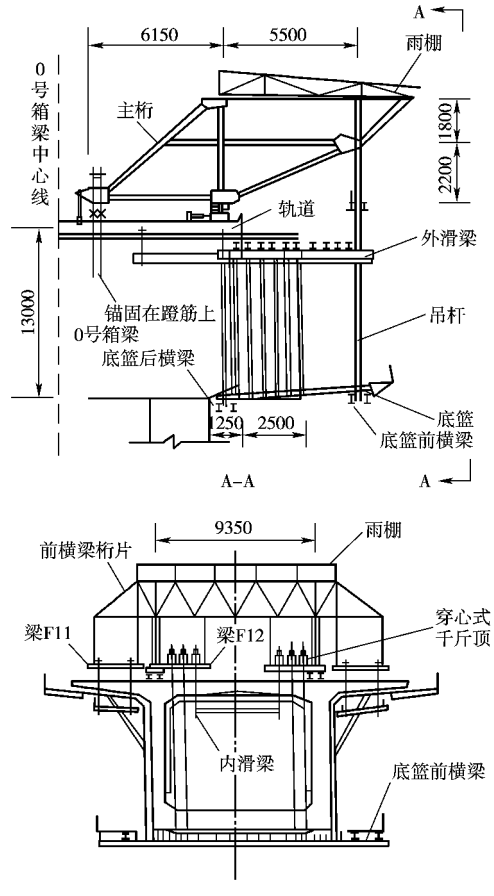


图 4-2-41　湖北黄石长江大桥菱形挂篮总体布置图

②挂篮行走装置：挂篮前支点下方设置滑船由液压顶推油缸在工字钢轨道上顶推前移，钢制滑船下紧贴一块厚度 21mm 的橡胶四氟板滑块，轨道顶面焊接厚 3mm 的不锈钢板，滑块与不锈钢之间最大摩阻系数 $\mu=0.05$，可有效地减少顶推力。工字钢轨道由钢板焊接成没有接头的长轨($L=10.6$m)，比通常采用的短轨具有安装方便、移动迅速、行走平稳的优点。

挂篮后支点设锚固小车可在工字钢轨道上翼缘底面滚动前移，通过压在轨道上的锚梁与箱梁竖向预应力筋连接而锚固，从而取消了挂篮尾部配重，有效地减轻了挂篮自重。

③锚固装置：浇筑箱梁混凝土时，挂篮尾部通过锚杆与 8 根箱梁竖向预应力筋(Φ32/40SiMnMoV)连接进行锚固，锚杆上方设置千斤顶进行锚固力的转换并可调整挂篮悬臂端挠度，锚杆与箱梁竖向预应力筋连接设计了一种专门的连接器，能较好地适应钢筋预埋时在各个方向产生的误差。

④悬吊分配梁：为了便于工人操作，在前后横梁下方悬吊分配梁(2I40a/A3)，分配梁上安装液压提升装置，通过吊杆悬挂底篮及内外模板。

(2)底篮和模板系统

底篮和模板系统包括底篮、外模、内模、端模和工作平台等。模板面采用钢框高强竹筋胶合板($\delta=55$mm)，它具有轻型、高强、耐用、与混凝土粘附力小的特点，其中顶板和翼板采用设计荷载 300kPa 模板，腹板和底板采用 600kPa 模板。模板设计均按全断面一次浇筑箱梁混凝土考虑，整个模板系统均随主桁行走一次到位，整个系统操作简便，有效地缩短了模板移动和安装周期，保证了混凝土外观质量。

①底篮：由前横梁(2QI55/16Mn)、后横梁(2QI65/16Mn)、纵梁组成，横梁与纵梁连接采用栓接，模板直铺于底篮上。前后横梁通过吊杆悬吊在主桁的分配梁上，吊杆(Φ60/35CrMo)采用分段可拆卸方式以适应梁高变化。浇筑混凝土时，后横梁设五根锚杆(Φ80/35CrMo)锚固在前段已完成的箱梁底板上，减少了后横梁的挠度，并通过千斤顶施加预紧力使底模板与前段箱梁混凝土紧密贴合，确保接缝处不漏浆。

②外模：由模板、骨架、滑梁(Φ155/16Mn)组成，滑梁用于支承模板、前端悬吊于主桁前分

配梁，后端悬吊于已浇箱梁翼板上，挂篮前移时则悬吊于主桁后分配梁，外模所有吊杆的采用精轧螺纹钢筋，这种悬吊模板方式取消了常见的侧模支撑架，进一步减轻了自重。

③内模：同样由模板、骨架、滑梁组成。支承内模的滑梁前端悬吊于主桁前分配梁，后端悬吊于已浇筑箱梁顶板上，箱梁腹板厚度变化引起内模顶板宽度的变化可通过横肋上设置的活动销来实现，模板高度的变化则通过增减块板来完成，竖肋与横肋连接处设铰以利拆模。

④端模：采用分块钢模板以适应箱梁腹板厚度和孔道位置的变化，端模板外包内外模前端，用螺栓固定，在箱梁顶板上方端模是由伸出端面的结构钢筋来固定。

⑤工作平台：在底篮两侧、前后端及外模翼板外侧设置固定工作平台，在内外模和箱梁前端设置悬吊工作平台，用倒链葫芦自由升降。共计 11 个工作平台，便于箱梁任何位置的操作。

(3)液压和电气系统

液压装置是为挂篮行走、模板升降及以后锚转换提供动力；电气部分则是对各液压装置动作进行控制。采用这套系统，提高了机械化和自动化程度，减轻了劳动强度，提高了生产效率，增强了挂篮施工安全可靠性，缩短了施工周期。

①挂篮行走：在主桁两侧前支点滑船后方各设一台顶推油缸(DGJ100E×1500)，最大行程 150cm，顶推速度控制在 0.5m/min 左右，油缸后端设计一专门的夹紧装置固定在工字钢轨道上，油缸进油时推动滑船带动整个挂篮前移，到达行程后，松开夹紧装置使油缸回油，便自动将夹紧装置前移，重新固定后，再开始下一行程动作，如此往复几次直到最后就位，当挂篮前移长度为 4.5m 时，仅三个行程即到位，20min。

②模板升降：内模升降采用 4 台 YC-60A 型千斤顶，底篮升降采用 4 台 YC-120 型和 2 台 YC-60 型千斤顶来完成。通过电气集中控制，既可 4 台千斤顶、2 台千斤顶同步运行，也可单台千斤顶个别调整，使得模板高程调整很方便。

③后锚转换：挂篮移动前，要先将后支点反力(锚固力)由原箱梁竖向预应力筋承受转换为挂篮尾部锚固小车承受，挂篮就位后，再将锚固小车上的反力转向竖向预应力筋，这些转换可由设在挂篮尾部锚杆上方的 2 台 YD-100 型千斤顶来完成。

④液压站：上述千斤顶配套设备，其输出的油压、流量满足各种工况要求。

⑤电气控制系统：通过可编程序控制器、按钮继电器、控制电磁转向阀的位置来达到控制各种动作的要求，该系统中设置连锁电路和非正常工作状况下的报警系统，实现了电气方面保护功能，还能根据报警提示找出并排除故障，从而提高了整个系统的安全可靠性，具有较高的自动化功能。

(4)挂篮各部质量

每个挂篮总重 104t，其中主桁系统 40.1t，底篮 28.6t，内模 12.9t，侧模 11.5t，端模 2.9t，平台 3.5t，液压电气系统 4.5t。挂篮总重与箱梁块段重之比(挂篮工作系数)为 104/265≈0.39。

4. 菱形挂篮主桁计算

(1)荷载系数

有关荷载系数依据交通部颁布的《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)，荷载系数取值如下：

考虑箱梁混凝土浇筑时胀模等因素的超载系数：1.05；

浇筑混凝土时的动力系数：1.2；

挂篮空载行走时冲击系数：1.3；

浇筑混凝土和挂篮行走时的抗倾覆稳定系数：1.5。

(2)作用于挂篮的主桁荷载

箱梁荷载:浇筑箱梁最大质量 265t,考虑浇筑混凝土时动力因素和挂篮施工安全方面的重要性,控制设计最大荷载 $W=1.2\times265=318$t。

施工机具及人群荷载 2.5kPa。

挂篮自重:104t;

风荷载(由当地气象资料提供):766Pa;

混凝土偏载:箱梁两侧腹板浇筑最大偏差取 $10m^3$ 混凝土,质量为 25t。

(3)荷载组合

荷载组合 I:混凝土质量+动力附加荷载+挂篮自重+人群和施工机具重;

荷载组合 II:混凝土质量+挂篮自重+混凝土偏载+人群和施工机具重;

荷载组合 III:混凝土质量+挂篮自重+风载;

荷载组合 IV:混凝土质量+挂篮自重+人群和施工机具重;

荷载组合 V:挂篮自重+冲击附加荷载+风载;

荷载组合 I~III 用于主桁承重系统强度和稳定性计算;荷载组合 IV 用于刚度计算,荷载组合 V 用于挂篮行走验算。

(4)结构分析计算

主桁结构内力与位移计算:挂篮主桁为空间桁架结构,杆件联结分刚性、铰接和半铰接节点,对于前后横梁桁片因采用焊接节点可处理为刚性节点,对于仅在一个平面内转动而另一平面不能转动的销接视为半铰接。计算主桁内力和位移采用《杆系结构通用计算程序》在微机上计算。

主桁杆件稳定分析:根据空间杆系计算出的内力,对各杆件按受拉受压分别进行计算,压杆采用相应的屈曲长度 kl,分别计算出平面内和平面外的压杆整体稳定和局部稳定,若各杆能满足稳定性要求,则桁架整体稳定也能满足。

其他构件计算:挂篮各种分配梁、销子、螺纹件、轨道等均采用自编施工设计软件包在袖珍电脑上进行计算。

所有计算均根据不同的计算图式与荷载组合,求得各构件的最大应力,经多次调整结构几何尺寸,以达到满足规范要求的前提下,使结构材料最省、质量最轻。

5. 菱形挂篮主桁测试

(1)挂篮测试的目的

主要是检验实际承载力和安全可靠性,并获得弹性和非弹性变形参数,为箱梁施工控制提供数据,同时检验挂篮加工质量。

(2)主桁测试方法

挂篮测试是在静态荷载下,对其主桁进行挠度观测和应力测试。主桁加载采用双壁钢围堰上设反力架承受拉力,以精轧螺纹钢筋作拉杆,利用穿心式千斤顶进行各级加载,如图 4-2-42 所示。分 5 级加载和 2 级卸载,等 5 级为挂篮最大试验荷载 318t。应力测试采用电阻应变片横向温度自补法以减小长期观测引起的温度影响误差,挠度采用精密水平仪配标尺进行观测。主桁应力和挠度测点布置如图 4-2-43 所示。

(3)测试结论

经过分别对黄石长江公路大桥 4 号、5 号墩使用的挂篮进行了主桁测试,由测试结果可得出下列结论:

①在分级荷载作用下,主桁各测点实测应力与计算值接近,且卸载后应力测点读数为零,

结构处于良好弹性工作阶段。

②实测挠度在扣除支座位移和参与变形后的修正值基本接近计算值，略偏大，这是主桁各销节点的剪切变形所致，主桁实测挠度较小，说明主桁刚度大，对保证箱梁混凝土浇筑质量有利。

③根据实测弹性和非弹性变形值所绘制的变形曲线，可用于箱梁施工中设置挂篮预拱度时参考。

6. 挂篮实施

挂篮拼装根据工地现场情况，主桁和模板系统安装采用平行作业，主桁利用墩旁塔吊直接在0号箱梁顶面整体拼装，顺序如下：轨道、主桁片、后锚、后横梁、前横梁、下平联、上平联、液压电气系统。在拼装主桁时，轨道上的锚梁与竖向预应力筋通过连接器连接从而固定轨道，主桁片在箱梁顶面水平拼好后，塔吊起吊翻转90°后安装，后横梁分三个单元安装，顺序先中间后两侧，前横梁整体拼装后一次吊装就位。安装主桁系统的同时，底篮、模板系统在后场整体拼整，浮运就位，利用设在0号箱梁段顶上的卷扬机分别提升侧模、底篮、内模、平台和端模就位，挂篮施工完后则按相反顺序拆除。

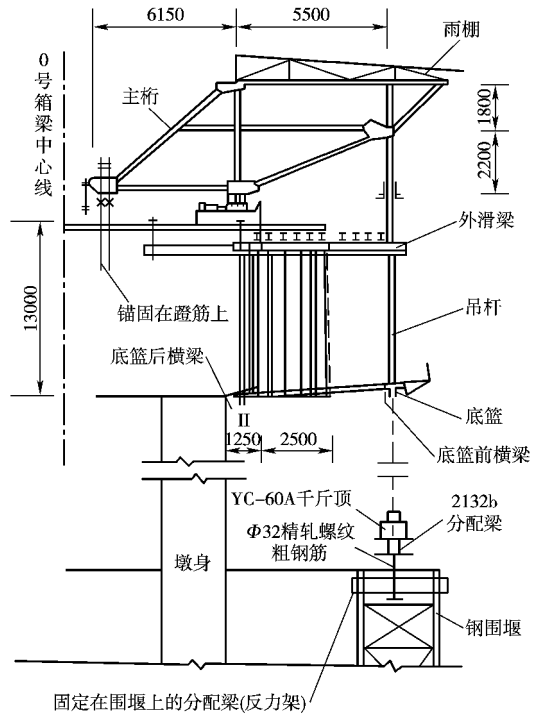


图4-2-42 挂篮0号箱梁段加载试验示意图
(尺寸单位：mm)

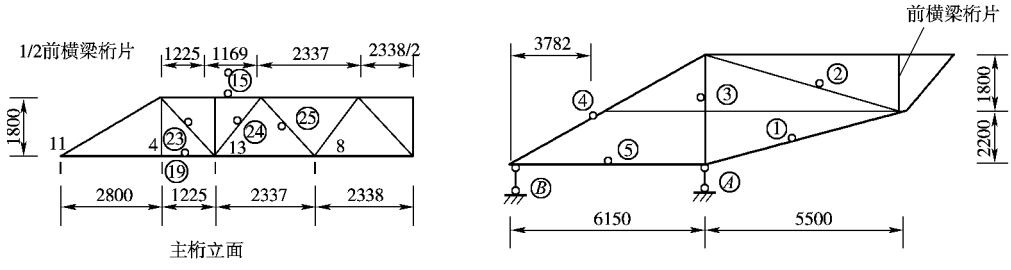


图4-2-43 挂篮主桁杆件应力和节点挠度测点布置图

说明：1.“◦”表示应力测点，“1”表示挠度观测点。

2. 圆圈内数字为杆件编号，无圆圈数字为变形测点编号。

3. 尺寸单位为mm。

挂篮前移过程是脱模后，用2台100t千斤顶顶升挂篮前支点使滑船脱离轨道，解除轨道锚固，轨道下垫滚筒，用倒链葫芦将轨道拖拉前移就位。千斤顶回油使前支点落回轨道面上，重新锚固轨道，通过主桁后锚千斤顶将后锚上拔力转换给轨道后锚行走小车承受，由液压顶推油缸顶推挂篮主桁，带动底篮、内外模一起前移，挂篮就位后及时通过后锚千斤顶将后锚小车的上拔力再转由竖向预应力筋承受，上述整个挂篮移动过程仅3h左右。

挂篮经实际使用，每段箱梁平均施工周期7d，最快仅5d，比计划12d缩短了5d，按一个“T”32对梁段，可缩短工期160d，为黄石长江公路大桥提前建成通车创造了有利条件。

第三章 大跨度预应力混凝土梁预制悬臂拼装施工

DISANZHANG

预制拼装法施工连续梁或连续刚构是从欧洲引入我国的一种施工方法，我国在1965年左右开始运用此法进行悬臂施工，但由于各种原因，使用得并不广泛。近年来，随着施工机具的改善和技术的进步，开始比较多地采用这种方法，如在苏通大桥引桥上就采用了这种方法。

预制节段拼装施工法一般是将大梁分为横向全宽，纵向分段的节段。节段长约3m，用长线法或短线法生产，汽车运输到现场，起吊拼装，经预应力等工作，连成大梁整体。实践证明，此法快速、安全，容易保证质量，从而收到了较好的经济效益。

第一节　预制悬臂拼装与悬臂浇筑的比较

(1)梁部混凝土的设计预应力值易于控制。相对于悬臂浇筑法施工，梁节段是在地面预制场提前进行的，所以，梁上的悬拼施工施工时，梁节段一般在预制场已经浇筑一段时间，混凝土的收缩已发生了相当部分，因此，在梁架设到桥位后，徐变变形就比较小，预应力束张拉后预应力损失相应也比较小，且易于控制。

(2)相对于悬臂浇筑法施工，不需要空中施工模板，而将模板浇筑的工序放在了预制场，并且使混凝土的浇筑在地面进行，可与桥梁下部的施工同时进行，拼装时占用施工周期仅有吊装定位和穿束张拉等工序，一个梁节段的施工周期仅用1～1.5d，而悬臂浇筑一般每个梁节段的合理施工周期需要7d左右，有利于加快上部结构的施工速度，而且当采用空中吊架法施工时，使空中施工得到很大简化。

(3)混凝土的浇筑质量容易得到保证，梁段在地面预制场预制，立模、浇筑、振捣、养护等条件均比空中好，可工厂化生产，机械化施工，工序流程固定，施工质量容易得到保证。

(4)相对于悬臂浇筑法施工，不受或少受气候的影响，拼装时若用干接缝结合，在低温时照样可以施工，如环氧树脂胶接缝，就有在－15℃条件下成功施工的例子。

(5)相对于悬臂浇筑法施工，需在地面增设预制场，预制好的节段要平移或纵移，需要一定面积的存梁场；当采用连续桁架拼装法施工时，需要比较庞大的钢结构，因此会增加一定的费用。

(6)相对于悬臂浇筑法施工，梁段一旦预制，在空中吊装时的调整余地很小，悬臂挠度控制比较难，必须要严格控制梁段的预制质量，以使相邻梁段间在拼装时接缝顺利啮合，并保证悬

拼施工时梁部结构的线形。

第二节　悬臂拼装施工梁段的预制

一、预制场的设置

预制场的设置应综合考虑桥位处的地形地质，预制节段的运输、机具器材的出入，防洪，临时工程费用等因素，选择足够布置预制、存放梁段面积的场地，同时方便梁段和机具出入，砂石料的运输。

二、梁段预制台座的类型

1. 固定台座(长线预制法)

该法的底座是按整跨梁的长度预先做好，通过移动侧模顺次完成所有块件的预制，其优点是梁底的曲线可以方便准确地放样，但蒸养设备随着预制节段需要纵移，占地较多。该法又称侧模移动法，如图 4-3-1 所示。

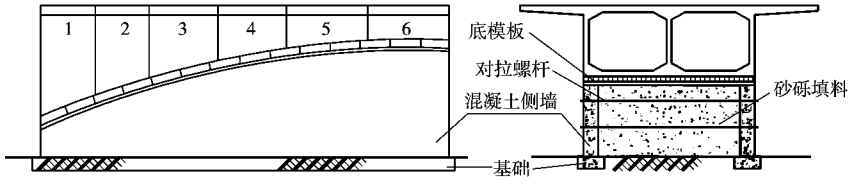


图 4-3-1　长线预制箱梁块件的台座

2. 活动底座(短线法)

该法是在可以纵移和调整底模设备的底座上浇筑梁段，每浇筑一个新节段，相邻底座在梁段吊运后即移走，重复使用。该法要求待浇梁段一侧的端模板刚性很大，另一侧端部则以已浇筑的梁段(也称为配筑单元)充当端模。这种方法的优点是底座长度短，浇筑位置固定，便于养生，适宜于工厂化生产，但要求底模可纵移并且可调，因此结构较长线法要复杂，需专门进行设计和制作。该法又称为侧模固定法，如图 4-3-2 所示。

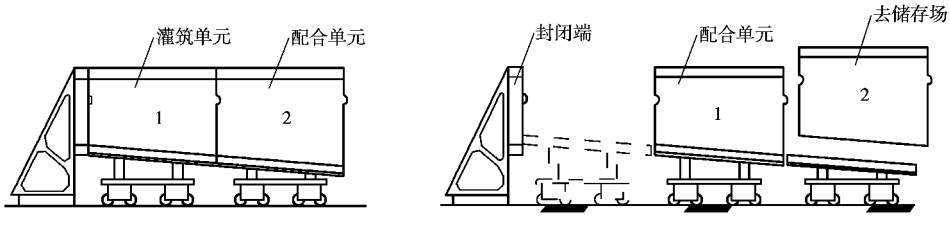


图 4-3-2　短线法预制箱梁块件

三、梁段预制方法

1. 梁段长度的确定

梁段预制长度的确定依据应便于预制、存放和安装，主要由以下考虑因素：

(1)满足吊装能力的要求。

(2)满足预应力管道弯曲半径及最小直线段长度的要求。

(3)梁段规格应尽量少,以方便预制和提高模板的利用次数。

(4)方便移梁和存梁。

2. 混凝土梁段的预制

(1)长线预制法

①形成底模

底模的形成是长线法的关键,应当根据预制场的地形和地质情况,选择既经济又能保证底模稳固的地基加固方法,通过堆筑土模、砌石、打桩或其他地基加固方法,并在表面浇筑一层混凝土,形成符合梁段底缘几何形状的底模。

②侧模及端模及混凝土浇筑

侧模及端模一般采用钢制大模板,以使梁段形状准确,并便于装拆和重复使用。为加快施工进度并保证节段间密贴,常采用先浇奇数节段,然后利用奇数节段为端模浇筑偶数节段。当节段混凝土达到设计强度的 70%以上或设计要求的强度时吊出预制台座,存放在存梁场。

(2)短线预制法

主要设备:

用短线法生产混凝土节段的预制场主要设备是浇筑机,其构造示意如图 4-3-3 所示。

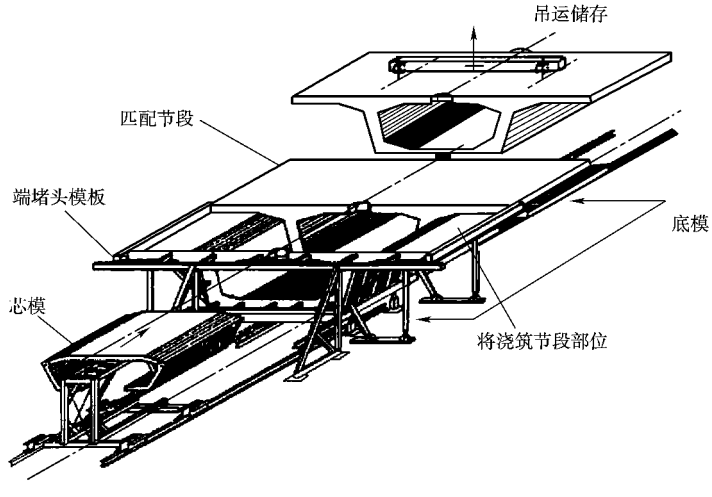


图 4-3-3　浇筑机示意图

节段底模板放在有轨道的平车底盘上,车长与节段长度相同。平车底盘与节段底模板架之间的四角设有千斤顶,用以调节高程。当已浇节段作为匹配节段时,调节其高程以适应大梁纵向曲线和预挠度的要求。同时两者之间还应能相互略有平转,以适应大梁平曲线的要求。

平车车轮有用钢轮的,但还可用履带式滚轮(美国 HILMAN ROLLERS)。履带式滚轮高度很低(如负荷 200kN 仅 150mm),直接放在平车底盘架下,使用方便。同时,也降低了底模板高度。

浇筑节段的侧模板支承在两侧平台上,可下放或外移。对于大梁平曲线的缓和曲线段,由于梁外形要求,侧模板面应可略有扭转。

端堵头模板一般固定在支架上,不移动。剪力齿模具固定在板面上,并保持与侧模相互垂直。

芯模固定在平车的悬臂支架上,由液压系统操纵其撑开就位和缩小脱出。当有节段内设

有锚头齿板时，要仔细考虑使其撑开时能成型齿板，缩小时又能易于脱出。

每台浇筑机的主要部件有：

平车及底模板至少 2 台，并有轨道和牵引平车设备；

侧模（包括两侧）1 套；

端堵头模板支架 1 套；

芯模 1～2 套，视箱内锚具齿板情况而定。

在墩顶的节段，因有横梁，芯模要现拼。底板放支座处，因桥有横坡或需设曲线超高，以及在纵坡上，为使支座保持水平，此部分模板应与支座配合，要进行专门处理，比较费工费时。

关于较大跨度变高度梁的浇筑机示意如图 4-3-4 所示。

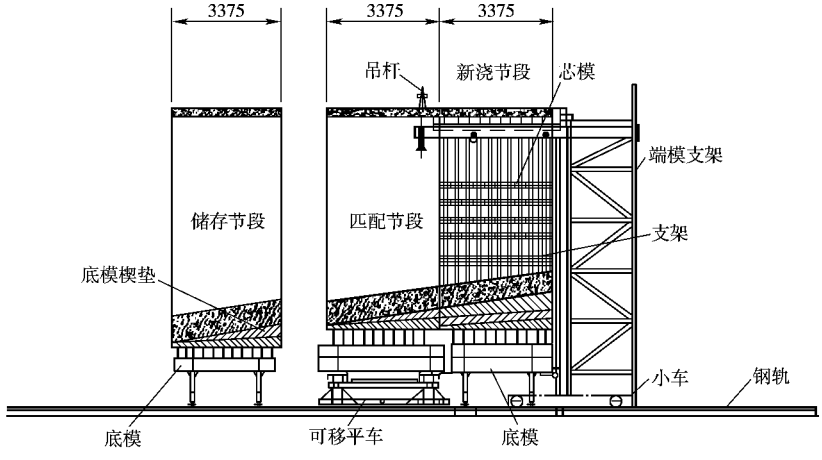


图 4-3-4　变高度梁浇筑机示意图（尺寸单位：mm）

浇筑节段主要工序：

将新浇节段脱去侧模、芯模和端模以及原有的匹配节段，并作全面检查，包括检查混凝土表面质量，节段主要尺寸。如果发现问题，要及时进行处理。当尺寸误差较大时，要在下一节段及时调整。

移去原有匹配节段，并起吊运走储存，将其平车吊出轨道供下节段使用。

将新浇筑节段移至匹配段位置，成为新的匹配节段，并校正其高程和平面位置。

将前吊出轨道的底板平车吊到现浇节段位置与匹配段相连，调正位置，安装侧模板，测量定位。

清理模板，涂上脱模剂，包括在与匹配段相接端头。

吊入在钢筋预制架上的钢筋笼（包括预应力管道）并定位。安装端堵头模板。在管道内穿入聚脂管，伸入匹配段 50cm 并加气压，以保持节段间管道连接平顺。

安装芯模和附件，包括用于起吊的预留孔。

全面检查测量。

浇筑混凝土，在混凝土初凝前后，在新浇节段上设中线及两条控制线的定位标志。

养生。

当新浇节段的混凝土强度达到 20MPa 时可脱端、侧模，新浇节段及匹配节段分离前移。匹配节段的混凝土强度达到 25MPa 可起吊运走。

一般以上前 9 个工序约需 3～4h，1 套浇筑机并辅以相应设备，在熟练工人操作下，一天一

节段是公认的效率。当然，墩顶节段要 2～3d 才行。

施工设计，测量和试验工作：

采用预制节段施工法，箱梁的预应力钢索设计和布置，不仅要满足大梁运营阶段的设计要求，还要与施工方法相配合。

当用悬臂法拼装大梁时，负弯矩主钢束都应按分段悬拼的要求，逐段锚固。主索的锚固位置有两种：一种是锚固在节段端部，位于行车道板与胶板交会区域，此处面积较大，便于安装锚垫板，以及锚下应力较小；另一种是将锚头布置在节段中部，车道板与腹板交叉处，箱内侧设齿板、锚具。两种设计都要求钢束必须平弯到车道板与腹板交会部位才能锚固。

至于在底板内的后穿正弯矩钢束，也要平弯到腹板与底板交会处，并设齿板锚固。此类设计悬臂施工主钢束往往采用第一种方法锚固。

当用逐孔施工法拼装大梁时，主钢束的布置与逐孔现浇方法类似，主束大都布置在腹板与车道板或底板交会的部位。根据主梁正负弯矩和剪力要求，主束在梁内上下弯曲、全梁贯通，仅在梁两端设锚具，并在逐孔施工的工作缝处（约为跨径 l 的 $0.2l$）的腹板区用联结器锚固，次跨施工时再接长。此种布置的钢束有整体性，并能抗梁体剪力，但腹板较厚。

在预制时，处于无应力状态。其外形几何尺寸正确与否，是拼成大梁、进而成桥外形的关键。要求全桥完工后，有的甚至规定完工后 30 年期，其纵、平面尺寸应与设计图纸相符合。

按规范和施工要求作混凝土配合比试验，要有适当的工作度，用插入式和表面平板振捣器即可捣实，并在浇完 14～16h 后强度达到 20MPa。按规范作混凝土弹性模量，收缩和徐变值测定。

预应力材料按规定作测试，确定有关数据，如预应力及其损失等。

按设计施工方法、程序，分起始拼装、体系转换、二步恒载和运营阶段，分别对结构施加荷载，包括节段自重、施工荷载、预应力以及混凝土收缩和徐变、预应力及其损失等诸多因素，求出节段在各施工阶段的应力和变形，拼成结构物的平、纵曲线，以便检查。

以运营阶段各节段产生的最终弹塑性变形和应力值与按设计大梁的平、纵曲线节段尺寸迭加，即为无应力状态下节段的预制尺寸。

一般在每节段桥面板上设有 6 个标志点，2 个在中线上，另有 4 个分别在平行于中线且临近腹板顶面的两条导线上。节段外形的预制尺寸，表现为此 6 个标志点的平面位置和高程，以及在模板上的相关位置和高程。

施工时，以浇筑机底模板下 4 个千斤顶调整底模板平面的高程，决定其横向坡度（实测侧模腹板上转角处）。由匹配节段的定位（平、纵、横三个方向）决定匹配形状，从而决定新浇节段的平、纵位置，浇筑机的端模是与节段垂直不变的。

因此在每台浇筑机前方适当距离均设有专用测站，一般台高 3～4m，放置仪器支架与人站工作台分离，以精密经纬仪严格控制节段尺寸。

编制节段浇筑手册，加强质量管理，对施工人员要进行培训。要先做试验节段，经检查合格才能正式生产。

应当指出，用悬臂法施工，因有跨中合龙段，梁的外形略可调整；而用逐孔施工法，无现浇段，对节段尺寸形状要求更加严格。因为，如有较大偏差，调正较难。

预制场地布置：

预制场地布置可如图 4-3-5 所示。

以节段数量和进度要求决定浇筑机的台数和与之配合钢筋笼制作支架数。如中等规模的

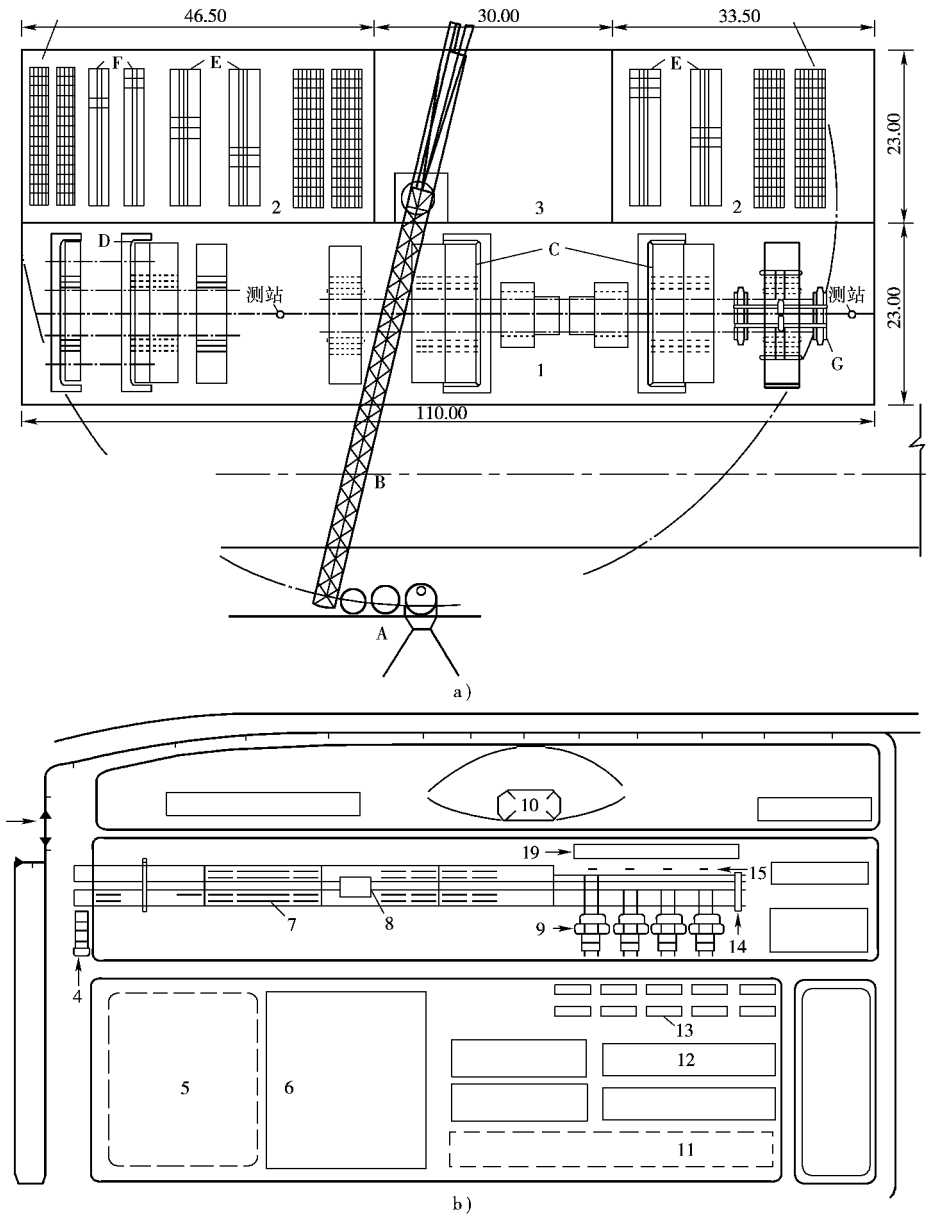


图 4-3-5　**预制场地布置图(尺寸单位**:m)

A-**混凝土拌和站**;B-**塔吊** 5t/40m **高** 14.5m;C-**标准节段浇筑机**;D-**墩顶节段浇筑机**;E-**标准节段钢筋笼制作支架**;F-**墩顶节段钢筋笼制作支架**;G-**载重** 85 t **四轮框架式吊车**;

1-**预制场**;2-**顶制节段钢筋储存和加工场地门**;3-**钢筋堆场**;4-**运节段汽车**;5-**停车场**;6-**材料堆场**;7-**节段储存场地**;8-**运节段平车**;9-**浇筑机**;10-**拌和站**;11-**钢筋堆场**;12-**钢筋加工车间**;13-**钢筋笼制作支架**;14-**龙门吊车**;15-**测站**;

工程,需用 3～4 **台浇筑机,场内主要运输可考虑用大型塔吊完成下述工作:钢筋笼由制作支架起吊到浇筑机上;将混凝土由拌和站直接提运到浇筑机上;匹配节段由龙门吊起吊运走后,将其平车吊到新浇筑节段位置等。**

一般用龙门吊将匹配节段吊上运输平车,以轨道运输平车运到储存地,再用龙门吊到储存台座上,可堆两层节段。装车外运时,亦用此龙门吊装车。

当预制节段数量较多,浇筑机多台依次排列,工作范围较大。因塔吊臂工作范围有限或不

方便时，可用履带吊将钢筋笼吊出就位和吊运浇筑机平车，混凝土用搅拌车运输，以吊车提向浇筑机，或用专用小型皮带机将混凝土由搅拌车送到浇筑机上。

更可用四轮胎框架式吊车，来完成龙门吊和轨道平车工作。此设备如港口用于吊、运、存集装箱的吊车，也不需轨道，方便快捷。

该法通过调整外部及内部模板的台车与端架来进行预制，首节梁段浇筑完成后，在其一端安装下一节梁段的模板，并利用首节梁段的端面作为新浇梁段的一侧端模，另一侧端模则用钢模板。

该法适合于工厂化生产，设备一般可周转使用，但节段的尺寸和相对位置的调整比较麻烦，需精细地进行施工。

梁段间和底模隔离剂：

在梁段预制时，其底模板和端模或相邻阶段间端部都要涂刷一层隔离剂，以保证表面不致粘连，常用的隔离剂主要有以下几种类型：

薄膜类：包括塑料薄膜、水泥纸袋等，其隔离一般较好，但在振捣过程中，容易产生破损、折皱。

油脂类：用废机油涂抹，一般能取得较好的隔离效果，但由于清洗困难，容易影响混凝土的外观。

烷基苯磺酸纳：效果好，易清洗，但费用较高。但从保证质量的观点出发，物有所值。

预应力钢束孔道成型：

为了保证预应力束的顺利穿束和张拉，以及尽量减小由于管道不顺滑引起的摩阻力增大，保证预加应力值的准确性，节段预制拼装法必须保证预应力钢束孔道成型位置、尺寸、间距和孔壁光滑，并保证孔道在压浆时不会串孔、漏浆。其具体偏差范围见有关规范，或从设计规定。

第三节　梁段的运输和悬臂拼装的施工方法

一、节段的场外运输

由预制场将节段运到工地安装，一般均由专用拖车运输。跨度 50m 左右箱梁节段，重 60～70t；跨度 100m 及以上的节段，重 150t 以上，要用载重 200t 专用拖车。同时节段设计上也要采取措施，如将墩顶的 0 号节段纵向分成两段，在工地以临时预应力钢筋拼成整体，在两段各有的横梁之间浇筑混凝土填实。

二、梁段悬臂吊装的施工方法

梁段悬臂吊装的施工方法主要有：

1. 吊架悬臂式吊装

吊架相当于现场悬臂浇筑的挂篮的梁上受力结构，增加提升系统而形成，块件运至需安装位置的下方，通过位于悬出部分的吊机将块件起吊安装，安装就位后，在就位梁段上前移吊机，安装下一块件。

因此悬臂式吊装系统应由吊机、支承吊机的悬臂梁以及能向前移动的装置构成，在吊装过程中为保持悬臂梁的平衡应设置前方的支承平台，并注意后方与梁体的锚固构造，以利安全施工。

2. 安装梁吊装

当不能使块件沿着桥梁纵向将预制块件运至安装位置的下方时，或当桥孔较多时采用连续桁架拼装成的安装梁进行吊装。

采用这种安装方式时，将块件运至桁架的安装位置，然后由装在桁架上的滑车将块件运至安装位置，待整孔安装完成后，移至下孔安装梁段。

3. 缆索吊装

采用缆索吊装多用于桥下不通航且桥墩较高的场合，在悬臂拼装时，桥墩两侧块件应同时对称起吊，故缆索吊机的主索至少须 2 组。

4. 浮式起重机吊装

在水深但流速不很大的江河湖海上安装桥梁时，可设置浮式起重机吊装。

三、吊装系统的设计

预制块件的安装是在施工墩顶 0 号块件完成后开始进行的，0 号块件为预制块件的安装提供必需的施工作业面，可根据预制块件的安装设备决定 0 号块件的尺寸。分段吊装系统的设计取决于预制块件的质量、桥梁施工现场的特定环境等因素。以下就悬臂拼装施工法中常用的吊装系统的设计予以介绍。

1. 桁架式悬臂吊机安装系统设计

悬臂吊机由纵向主桁架、横向起重桁架、锚固装置、平衡重、起重系统、走行系统和工作吊篮等部分组成。如图 4-3-6 所示。

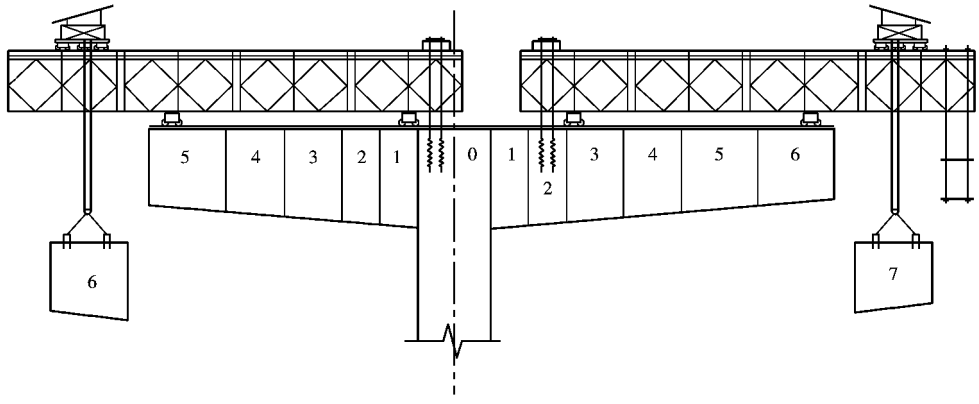


图 4-3-6　桁架式悬臂吊机构造图

纵向主桁为吊机的主要承重结构，可由贝雷片、万能杆件、大型型钢等拼制。一般由若干桁片构成两组，用横向联结系连成整体。前后用两根横梁支承。

横向起重桁是供安装起重卷扬机直接起吊箱梁块件之用的构件。纵向主桁的外荷载就是通过横向起重桁传递给它的。横向起重桁支承在轨道平车上，轨道平车搁置于铺设在纵向主桁上弦的轨道上。起重卷扬机安置在横向起重桁上弦。

设置锚固装置和平衡重的目的是防止主桁架在起吊块件时倾覆翻转，保持其稳定状态。对于拼装墩柱附近块件的双悬臂吊机，可用锚固横梁及吊杆将吊机锚固于 0 号块上，对称起吊箱梁块件，不需要设置平衡重。单悬臂吊机起吊块件时，也可不设平衡重而将吊机锚固在构件吊环上或竖向预应力筋的螺丝端杆上。

起重系一般是由电动卷扬机、吊梁扁担及滑车组等组成。起重系的作用是将由驳船浮运到桥位处的块件，提升到拼装高度以备拼装。滑车组要根据起吊块件的质量来选用。

吊机的整体纵移可采用钢管滚筒，在木走板上滚移，由电动卷扬机牵引。牵引绳通过转向滑车系于纵向主桁前支点的牵引钩上。横向起重桁架的行走采用轨道平车，用倒链滑车牵引。

工作吊篮悬挂于纵向主桁前端的吊篮横梁上，吊篮横梁由轨道平车支承以便工作吊篮的纵向移动。工作吊篮供预应力钢丝穿束、千斤顶张拉、压注水泥浆等操作之用。可设上、下两层，上层供操作顶板钢束用，下层供操作肋板钢束用；也可只设一层，此时，工作吊篮可用倒链滑车调整高度。

这种吊机的结构较简单，使用最普遍。当吊装墩柱两侧附近块件时，往往采用双悬臂吊机的形式，当块件拼装至一定长度后，将双悬臂吊机改装成两个独立的单悬臂吊机，如图4-3-7所示。

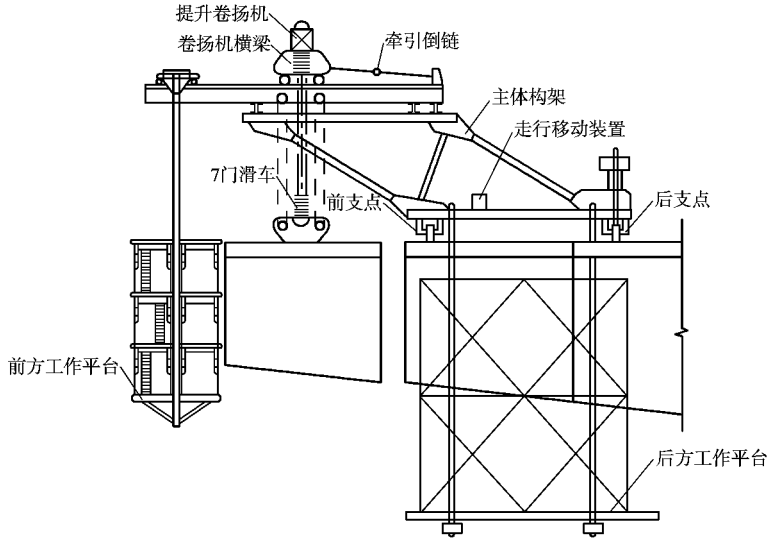


图 4-3-7　菱形挂篮安装系统

2. 菱形挂篮安装系统设计

菱形挂篮由菱形主体构架、支承与锚固装置、起吊系、自行走系和工作平台构成，如图4-3-6所示。

预制好的块件挂车式轮船运至合适的位置，用两台 6t 杠杆式滑车倒链将块件提起，并保持新旧块件之间 50cm 以上间距，在接合面上两面都涂上粘结剂，再用 6t 的杠杆式滑车倒链将块件拉至滑车倒链充分受力，并进行高度和水平方向上的微调。随后，张拉临时固定的预应力钢筋，使块件定位，张拉预应力主钢束，放松临时固定的预应力钢筋，前移挂篮，完成本单元安装工作。50t 菱形挂篮规格见表 4-3-1。

3. 连续桁架拼装法

(1)准备工作

架桥设备的拼装，在桥头跨堤上作荷载试验，检查其功能和强度。要作环氧粘合剂试验，其强度应高于混凝土抗拉强度，其成分要保证热稳定性、低徐变、不溶解性、无有机反应等特征，详见 AASHTO 标准规范的有关章节。

节段在预制场储存至少 14d 才能安装。

菱形挂篮规格表　　表 4-3-1

额定荷载		50t		
吊重		50.6t		
吊具自重		0.6t		
扬程		10m		
动力机械	种类	电动机	电动机	电动机
	额定输出	11kV	1.5kW	3.7kW×2
	用途	起吊	横移	行走
钢丝绳额定速度		4.7m/min	1.1 m/min	413mm/min
使用滑车		6 门滑车		
安全装置		防止螺丝卷动的装置		
制动 4e		电磁式制动器		
电源		Ac50Hz220V		

节段在安装前两天内，要在预制场检查、核对，清洁预应力钢的管道，对两端的粘合面要进行喷砂和喷水处理。

安装方法，因工地情况和设备配置而异，在条件允许情况下，有用跨径 40m 跨墩龙门吊的、用大型履带吊的、用大型浮吊和安装于拼成梁段上的悬臂吊机从船上起吊的，但较多的是用梁式架桥机，从桥头开始采用悬臂拼装或逐孔施工。特点是干扰少，安全质量容易保证，效率也高。

(2)悬臂拼装法

现简要介绍用梁式架桥机，从桥头开始的主要工序，如图 4-3-8 所示。

①第一阶段

在桥台后路堤上安装架桥机，并推向前到 1 号墩上，前支承在墩侧的临时支架上。

安装 1 号墩上 0 号节段，包括支座和临时约束。

在 0 号节段安装架桥桁梁的滚轮支架。

牵引桁梁前端到 2 号墩上，并支承前支点。将桁梁中支点固定在 1 号墩的滚轮支架上。

用一对在桁梁上的平车分别吊运 1 号和 1′号节段，进行悬臂拼装。当拼成几组节段后，可在桁梁与节段间设稳定钢臂，以增加悬臂拼装节段和桁梁之间的稳定性，直到拼成一个悬臂。

②第二阶段

在桥台与 1 号墩上悬臂间设临时支架，以安放此部分节段。安装桥台上节段并临时固定，依次安装相邻节段直到 1 号墩上的悬臂端，并立模浇筑合龙段，预应力后落临时支架，此时结构成单孔悬臂梁。

③第三阶段

桁梁前移，前端到 3 号墩上，以后工序同第一阶段有关步骤，立模浇筑 1 号墩和 2 号墩之间的合龙段，拆除 1 号墩上的临时固定，结构固定在 2 号墩上，安装 3 号墩上 0 号节段。

④第四阶段

重复第三阶段的步骤，直到将全联完成。其最后一跨将用类似第一阶段设临时支架的方法。

悬臂拼装，当跨度较大时应在悬拼墩顶梁下设一组千斤顶，在拼成一个 T 后，要调整 G 悬

臂端高程及平面位置以减少施工误差。

有关拼装细节可参见下述逐孔施工法。

(3)逐孔施工法

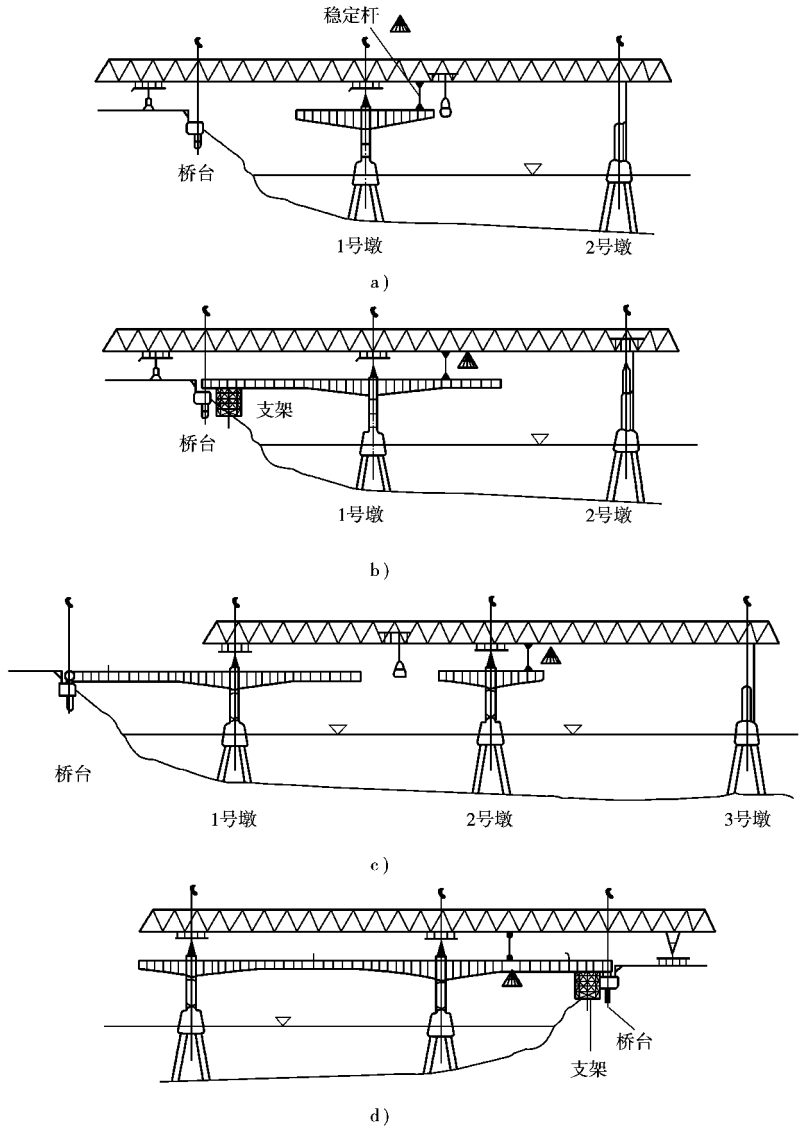


图 4-3-8　悬臂施工阶段程序示意图

a)第一阶段;b)第二阶段;c)第三阶段;d)第四阶段

逐孔施工法(图 4-3-9)是将一跨(一般由跨的 0.2l 处到邻跨的 0.2l 处)全部节段依次吊在或放在架桥桁梁上,但均先前移约 50cm,以与原拼成的梁段有一定操作空隙。然后,安装贯穿整个主钢束,与已成梁段主钢束用预应力束联结器相连。于是,将放在或吊在架桥桁梁上节段,依次后移拼上,以吊点或支点上千斤顶,调节各节段高程,使节段接缝处原则上仅受压紧环氧接缝的压应力。当拼成一跨,对主钢束施加预应力,节段也脱离架桥桁梁,与原拼成梁段构成一体。

架桥桁梁有设在桥面以上,以桁梁上平车和索具分别悬吊各节段,另一种是桁梁从下支承

节段，以放在上弦轨道上专用小车支承在节段悬臂板根部。同时在已成梁段端部有一起吊设备，负责将由拖车运来节段卸车，并放在桁梁上的小车上。此起吊设备为一个框架带悬臂结构，框架上有根可移横梁，横梁上附有长杆活塞吊具的天车。

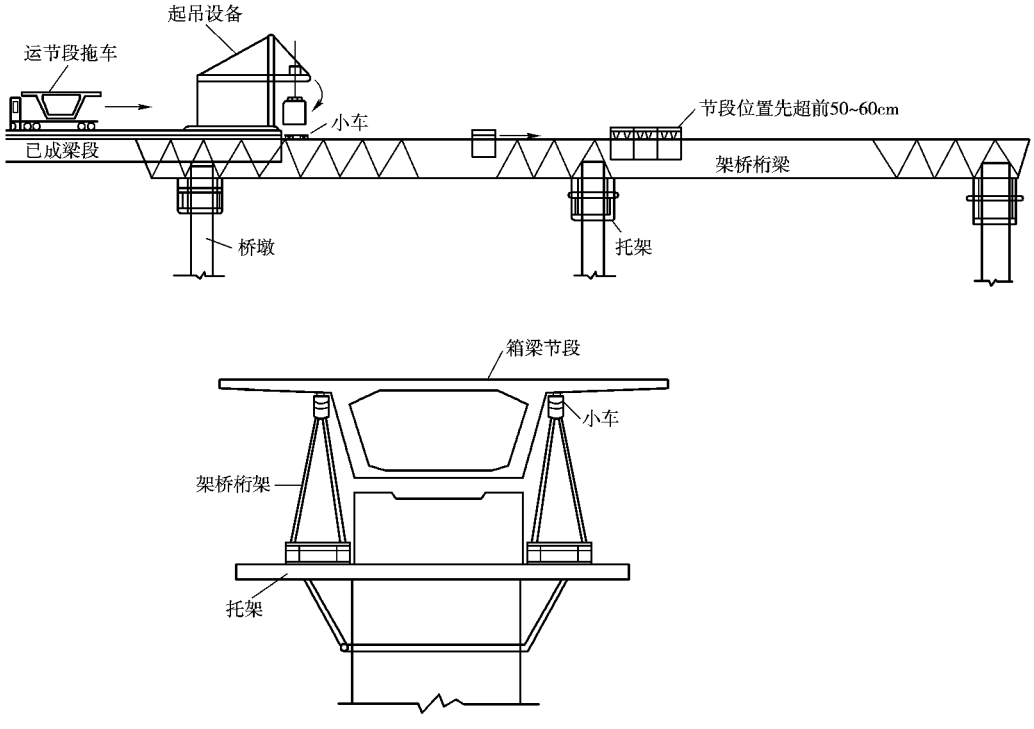


图 4-3-9　逐孔施工法拼装大梁节段示意图

现以上承式架桥设备的使用，说明逐孔施工主要工序：

①由拖车将节段运到梁端起吊设备框架下，用天车上长杆活塞吊具起吊节段，拖车退出。

天车移至框架前悬臂端，直到可将节段旋转 90°位置，转 90°使节段长向与桥中线垂直，置节段于架桥桁梁小车上，固定后牵引该节段至安装孔前悬臂端，并超前 50cm，以后依次将各节段放在桁梁上，均超前 50cm。

②穿预应力钢束，在已成悬臂端前 50cm 空隙内做钢束联结工作。

③调整小平车上节段高程和中线，使与已成梁段试拼，合格后再分开，作粘结工作缝。

节段如两面刷环氧树脂粘合剂，则为 1.5mm 厚（或单面刷 3mm 厚）然后再拼拢，并用临时紧固件预应力，使全断面压应力为 0.2～0.3MPa。

依次拼成全跨。

④对主钢束施加预应力，并监测挠度。

⑤下落桁梁约 30 cm。

⑥管道压浆。

⑦架桥桁梁前移至次跨。

起吊设备移到新成箱梁悬臂端，专门作业小组在桥下拆卸运输和安装桥梁的支承托架。

逐孔施工法因无现浇段，要求节段尺寸应更精确。但施工进度较快，据有关资料介绍，对于 50m 跨，可以做到 5d/跨。

无论采用何种方法，悬臂拼装或逐孔施工都要编制安装手册，经批准后严格执行，一切监

测手段也应反映在手册中。

第四节　预制拼装施工实例

一、某高速公路一座大桥悬拼施工

1. 桥梁概况

该桥是某高速公路上一座特大型公路桥梁，总体布置主桥部分的跨径组成为 50m＋100m＋2×160m＋100m＋50m，主梁采用预应力混凝土变截面连续箱梁结构，160m 跨主墩墩身为预应力混凝土薄壁空心结构，设计中考虑施工过程中可能发生的块件不平衡拼装及风力的最不利组合所产生的倾覆力矩作用。

主跨 160m 的箱梁高度从根部（支座处）的 9m，按二次抛物线变化至跨中 3m 高；腹板厚度：根部一定范围 65cm、跨中 40cm；底板厚度由根部的 110cm 变化至跨中的 22cm。单箱底宽 6.8m、顶宽 11.898m。拼装块件最大质量 125t，拼装块件分块长度有 250cm、300cm、350cm 和 400cm 四种。自由悬臂由 23 个块件（不含 0 号块）组成。跨中合龙段（现浇）长度 3m。

2. 梁体预制与运输

梁体块件采用长线法于大型预制场内预制，由大型龙门吊出坑后，运往栈桥下河，驳船运送块件到桥孔下，采用桁架式悬臂吊机起吊拼装。施工过程中用预应力把 0 号块与主墩作临时刚接，合龙后经体系转换为多跨连续结构。

3. 吊装系统简介

（1）吊机组成

一个箱梁悬臂上的悬拼吊机，其主桁长度 18m，为两组贝雷桁架（前四节贝雷的下弦用加强弦杆加强）组成，间距 6.44m，与肋板的竖向预应力筋对正。每组主桁为单层四排贝雷，间距为 22.5cm＋90 cm ＋22.5cm，由使用角钢焊拼成的特制贝雷横撑架横向连接而成。

（2）锚固系统

锚固系统是在梁块起吊、拼装和张拉等一系列工序中抗倾覆的必须措施，由 ϕ32 精轧螺纹粗钢筋锚杆，相应螺母、连接器、垫板及 125 工字钢拼成的锚梁组成。利用箱梁肋板内的 ϕ32 竖向预应力钢筋，将预应力筋露头部分使用连接器与锚杆连接，锚杆在主桁中间穿过，并穿过锚梁，最后由精轧螺纹钢筋配套的螺母锁紧，从而实现主桁尾部的锚固。该系统主要设置于悬拼吊机后部 3～4 道，以及前支点后面 1 道，作为抗风锚。

（3）提升系统

提升系统由 80kN 电动卷扬机、定滑车组、动滑车组以及转向滑轮组成。80kN 卷扬机通过螺栓固定于主桁上，定滑轮座由型钢拼成，支承于设于贝雷上弦的滑道上以实现纵向移动，定滑轮组置于其中，支承于滑轮座顶端；动定滑轮组均为特制双轴八轮滑车，设计起重能力为 800kN。使用 ϕ26～ϕ28 的钢丝绳，容绳量 550m，在动、定滑车间穿绕后通过转向滑车进入电动卷扬机，将动滑轮与箱梁块件的预埋吊环连接后，由电动卷扬机牵引钢丝绳实现梁块的提升。

（4）横联系统

整个悬拼吊机于上下游两组主桁间共设三道横向联结系，分别位于主桁头尾及前支点处，每道横联由两片桁架组成，均由角钢拼焊而成，与主桁栓接。

由 145d 工字钢、滑块、滑道及枕木组成。主桁支承于工字钢梁，工字钢梁通过滑块与滑道在手拉葫芦牵引下带动主桁前移，每组主桁有前后两个支点。悬拼吊机总体结构如图 4-3-10 所示。

在梁块浮运过程中，墩上则开动卷扬机将动滑车放至水面上一定高度，梁块送到并定位后，将动滑车下连接的钢板吊环与梁块上预埋的吊杆通过螺母紧固在一起，再分别开动上下游主桁上的卷扬机收紧钢丝绳，最后同时起吊。梁块提升过程中需由专人指挥、专人开机、专人排绳，在整个吊装过程中，应配备足够的通讯设备以便及时联络和命令畅通。在实际施工中，一般一个 T 的两端梁块并非同时起吊的，但尽量减短其时间差，一般不超过 2～4h。

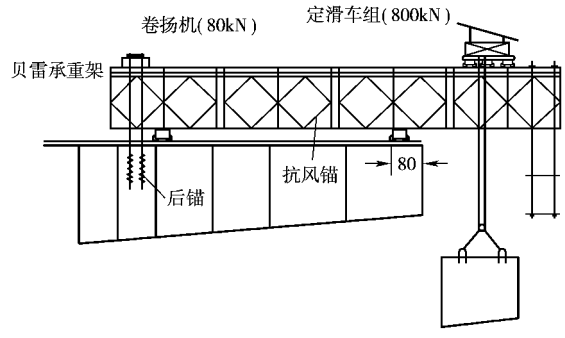


图 4-3-10　悬拼吊机结构(尺寸单位：cm)

4. 悬拼施工技术与工艺要求

主跨构件拼装从 3 号块件开始，每半个 T 构设 4 道湿接缝，以利于调整拼装过程出现的偏差。为了保证拼装梁体的外形及高程，设计上在每个拼合断面中设多重拼合键。工艺上采取两个措施：一是拼合表面涂抹环氧树脂粘合，二是拼装时底板设临时预应力张合缝，使树胶结硬前断面有 0.2～0.3MPa 的均匀压应力，并确保断面涂胶被挤出，接缝密合。

预应力混凝土主梁主孔拼装有以下特点：

(1)全断面预应力暗管无粘结拼装，钢束张拉锚固后仅限于锚固的当前块件的管道压浆，其他管道压浆均等拼装完成后一次进行。这样减少了孔道串浆的出现，争取了工期。

(2)断面中设多重拼合键，并在涂胶拼合后，先于底板施加临时预应力预应力钢束，使断面能够产生 0.2～0.3MPa 的均匀压应力。

二、美国鲍德温大桥预制悬拼施工

鲍德温大桥位于美国旧布鲁克林和旧莱姆两镇之间，跨越古老的康涅狄格河口，于 1993 年 5 月竣工。

该桥施工原计划采用梁体分段然后绞车拽拉到位的施工方案，计划工期 48 月；而后，承包商提出采用全自动的纵向吊装桁梁平衡悬拼来完成预制混凝土块件的就位工作的施工方案，工期提前 12 个月。

1. 箱梁节段划分

桥梁的跨径组成为 3×54.10＋5×73.15＋2×83.82＋73.15(m)，上部结构为全桥一联的等截面连续梁，双幅 8 车道公路桥，全桥节段分为四种类型：墩上节段、台上节段、B 型节段及 A 型节段，四种节段配合使用，通过顶板连续预应力筋和腹板及底板的连续预应力筋连成一体。

预制箱梁块件的横截面为梯形截面，设置混凝土斜撑予以横向加劲，第一节段梁高 3.6m，标准段长度 3.2m，墩台节段长度为 1.9m 和 2.2m，节段质量从 A 型的 127t 至墩台节段 136t 不等。箱梁顶板厚度 203mm，底板厚沿箱形中心线的 203mm 渐增至腹板处的 356mm，以容纳体内纵向力筋。在 B 型节段中，底板为等厚度 533mm，以承受悬臂平衡安装时的强大压力。

腹板上设多个剪切键，而沿顶板和底板又设剪切键和对准键。

2. 预制场地

预制场地距桥位约 2.4km，且位于商品混凝土工厂和桥位之间，省去了自建拌和站的费用。因为要制造三种类型的节段，须用三条节段组装线，组装线南北向相互靠近，施工设计采用短线法生产节段，用一台 272t 的门吊将节段吊运并拉入储存场。

3. 梁体节段生产

除墩台节段外，其他节段用短线台座浇筑，预制台座采用整套液压自动模具，沿预制模具和密接块件周围用蒸养罩封盖。节段生产平均需 2～3 个工作日。

4. 移动式连续桁架拼装系统

在本桥中采用该系统具有以下几方面优势：

(1)将水平作业量减少到最低限度，对河道的正常营运影响最小。

(2)缩短了工程施工工期，在寒冷的冬季施工不受气候影响。

移动式连续桁架长约 137m，重约 544t，采用液压缸顶起节段而不用钢缆绞盘拽拉，使得节段就位十分有利，因为操作人员可对荷载传递于结构的过程能加以控制。

5. 连续桁架系统的前移和块件安装

当本阶段块件安装完毕后，系统前移进行下一阶段块件的安装，桁架系统前移分五步进行，块件的安装分三步进行，共八个步骤，完成本阶段的安装工作。块件安装时一般应考虑以下问题：

(1)由于不等跨，设平衡重来平衡不平衡的自重，据施工阶段不同，平衡重三易其位，以适应平衡的要求。

(2)桥墩两侧各装两节段后，将桁梁稳定器连接于桥面，使上部结构在不平衡的施工阶段得以稳定。

(3)节段安装约达半数时，要检查、调整悬臂端的高程。

(4)全节段就位后，检查主梁的几何线形和尺寸。

最后，由鲍德温桥施工的成功，从中得到生产出优质的预制箱形节段是最重要的经验。不管安装工作是如何自动化和高效，一座悬拼桥梁结构的质量主要取决于梁段预制的优劣。

第五节　悬臂拼装接缝的处理

一、悬臂拼装接缝的类型和技术设计

1. 悬拼接缝的类型

悬臂拼装时，预制块件接缝的处理分湿接缝、干接缝、胶接缝和半干接缝等几种形式。不同的施工阶段和不同的部位，交叉采用不同的接缝形式。通常用于拼装与 0 号块连接的第一对块件采用需钢筋伸出并焊接的湿接缝。在满足抗剪强度要求的情况下，也可以采用无伸出钢筋仅填筑水泥砂浆的平面湿接缝。湿接缝施工占用工时多，但它有利于调整块件的位置和增强接头的整体性。密贴的平面或齿形干接缝可简化拼装工作，但由于接缝渗水会降低装配结构的运营质量和耐久性，故应少采用。目前，在悬拼施工中采用最为广泛的是应用环氧树脂按材料使相邻块件粘结的胶接缝。胶接缝能消除水分对接头的有害影响，从而提高结构的稳定性。胶接缝可以做成平面型、多齿型、单阶型和单齿型(图 4-3-11)等形式，齿型和单阶型的

胶接缝用于块件间摩阻力和粘结力不足以抵抗梁体剪力的情况，单阶型的胶接缝有利于施工拼装。在已建成的桥梁中，也有采用半干接缝形式的桥梁，预制块件在顶底板处采用干接缝，而腹板处采用湿接缝。施工经验表明：半干接缝对于调整悬臂位置是有利的。

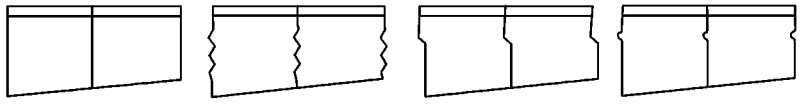


图 4-3-11　接缝形式

a)平面型；b)多齿型；c)单级型；d)单齿型

2. 一号块和调整块用湿接缝拼装

一号块件即墩柱两侧的第一块，一般与墩柱上的零号块以湿接缝相接。一号块是 T 形刚构或连续梁(临时固结)两侧悬臂箱梁的基准块件。悬拼施工时，防止上翘和下挠的关键在于一号块定位准确，因此，必须采用各种定位方法确保一号块定位的精度。定位后的一号块可由吊机悬吊支承，也可用下面的临时托架支承。为便于进行接缝处管道接头操作、接头钢筋的焊接和混凝土振捣作业，湿接缝一般宽 0.1～0.2m。

一号块件拼装和湿接缝处理的施工程序：

(1)块件定位，测量中线及高程。

(2)接头钢筋焊接及安放制孔器(非暗管结构的箱梁)。

(3)安放湿接缝模板。

(4)浇筑湿接缝混凝土(用高强度等级砂浆或小石子混凝土)。

(5)湿接缝混凝土养护，脱模。

(6)穿一号块预应力筋(束)，张拉，锚固。

跨度大的悬臂梁桥，由于悬臂很长，往往在伸臂中部设置一道现浇箱梁横隔板，同时设置一道湿接缝。这道湿接缝除了能增加箱梁的结构刚度外，也可以调整拼装位置。

在拼装过程中，如拼装上翘的误差很大，难以用其他办法补救时，也可以增设一道湿接缝来调整。但应注意，增设的湿接缝宽度必须用凿打块件端面的办法来提供。

3. 其他块件用胶接缝或干接缝拼装

其他块件的拼装程序为：

(1)利用悬拼吊机将块件提升，内移就位，进行试拼。

(2)移开块件，与已拼块件保持约 0.4m 的间距。

(3)穿预应力钢束。

(4)涂胶(双面涂胶)。

(5)块件合龙定位(利用定位器并施加一定压力)，测量中线及高程，检查块件出坑前所作跨缝弹线是否吻合。

(6)张拉预应力筋(束)，观察块件是否滑移，锚固。

4. 胶浆成分和调胶程度

胶接缝中所涂环氧树脂胶浆层厚 1.0mm 左右。它在施工中起润滑作用，使接缝面密贴，完工后可提高结构的抗剪能力、整体刚度和不透水性。干接缝，即接缝间无任何填充料，以往很少采用，主要担心接缝不密封会导致钢筋锈蚀。常用的环氧树脂胶浆由下列材料拌制而成。

(1)粘结剂

主要是环氧树脂，多选用牌号为 6101 的环氧树脂。这种环氧树脂分子量低(420～500)，软化点 18～22℃，工艺性能好，施工方便，可加入大量填料，既能改善胶料性能，又能节约树脂用量。

(2)固化剂

环氧树脂在加入固化剂以前不会硬化，加入固化剂后才能在很短时间内固化。胶接缝多采用胺类固化剂：乙二胺、间苯二胺和多元胺(如二乙烯三胺、三乙烯四胺等)。

固化剂的用量可以通过计算确定。在 100g 环氧树脂中所需胺类固化剂的数量为：

$$G=\frac{M}{H_m}\cdot h \tag{4-3-1}$$

式中：M——固化剂的克分子量；

H_m——固化剂中活性氢原子数；

h——在 100g 树脂中环氧基的含量(即环氧值)。

固化剂的用量一般多按实验法求得经验数值。应当注意，固化剂的用量必须适当，不够时不固化；用量较多时发脆；用量过多时也不固化。

(3)增塑剂

它能减低树脂的黏度，固化后增加胶体的塑性，提高其冲击、抗弯、抗拉、抗压强度。增塑剂有活性(与环氧能起化学反应)与非活性(与环氧不起化学反应)两种。胶接缝常用非活性增塑剂，如苯二甲酸二丁脂、苯二甲酸二辛脂、磷酸三甲苯酸脂等，价格低，但时间长易挥发导致老化。

增塑剂的用量决定于树脂的性能、填料的多寡以及胶接缝的强度要求和塑性要求，一般为 10%～20%，不宜过大，否则胶体的其他物理性能就要急剧下降。

(4)稀释剂

加入稀释剂的主要作用是减低树脂的黏度、增加流动性，便于施工。工程中采用的非活性稀释剂有丙酮、甲苯、二甲苯等，在一般情况下，其用量不超过树脂用量的 30%。在涂抹后应促使其完全挥发，以减少对树脂强度和老化性能的影响。

(5)填料

为了降低成本，改善拌和料的稠度和胶体的物理力学性能如强度、抗冲、收缩率、弹性模量等，一般均要选择适当的填料加入。胶接缝的填料一般使用水泥。对水泥的要求是干燥、无水，细度为 200～250 目。

(6)改性剂

加入改性剂的目的是改进树脂本身性能的某些缺陷和固化条件。为了改善胺类固化剂的低温固化性能，可以使用双组分固化剂。其中一个组分为胺类固化剂，另一个组分为用适当配方经高温合成的改性快速固化剂。视施工温度的不同，随时调整两个组分固化剂的掺用配合比。

调胶程序一般是在涂胶前一天将树脂加热到 60～100℃熔化称量，加入二丁脂，搅拌降温至 30～40℃，加稀释剂，混匀装入容器中备用，称之为甲组分。涂胶前再将装入容器的甲组分预热至 20～30℃，然后按比例加入固化剂搅拌均匀，再与填料 1 混合成胶泥即可涂沫。

二、拼装块件接缝施工工艺要求

梁体块件悬拼接缝施工工艺要求详见表 4-3-2。

块件拼装接缝施工工艺要求　　表 4-3-2

项　目	块件拼装接缝要求
接缝类别	块件拼装接缝一般为湿接缝与胶接缝两大类。湿接缝用高强细石混凝土作为接缝料，胶接缝则采用环氧树胶作为接缝料
湿接缝要求	由于1号块的安装对控制该跨节段的拼装方向和高程至为关键，故1号块与0号块之间的接缝多以采用湿接缝，以利调整1号块位置
胶接缝施工程序	2号块以后各块件的拼装，接缝采用环氧树脂施工时，其施工(拼装定位)程序： ①将块件吊升至拼装高度，就位试拼，移开块件离缝40cm左右； ②穿束、涂胶，正式定位，测量中线和水平，按设计要求张拉一定数量的钢束后放松吊机； ③全部钢束张拉完毕，进行压浆后，由0号块至张拉块进行高程和轴线测量
胶接料配置及涂胶操作要求	①环氧树脂粘料的配方，应作多种试配，然后根据接缝料所要求的物理力学性能、拼装时所要求操作时间以及施工温度等条件选择粘结强度、稠度和固化时间； ②在胶粘料操作过程中，应采用防护设施、防止有害气体从口腔进入人体，影响健康； ③配制胶粘料必须严格称量和搅拌顺序，已采用的配合比，不得随意变动； ④配制胶粘料的温度不宜超过30℃，加料时应边搅拌边加料，在前二种材料充分拌匀后，方可加入后一种材料，配制过程中严禁污染杂物、水分等混入，并防止日光直接照射； ⑤胶粘料的配制量应根据接缝面积确定，并需一次拌成。在块体定位无误和涂胶操作各项准备工作就绪后，方可加入硬化剂充分拌匀，在规定的时间内操作完毕，防止固化； ⑥应保持块件拼装面的干净，涂胶面须干燥，接缝如需承受拉力，其表面应凿毛，涂胶时块件表面温度不应低于10℃；涂胶固化过程中，宜控制块件温度与胶浆固化温度之差不超过15℃，使环氧树脂胶浆在稳定的温度中固化； ⑦涂抹胶粘料时，应自上而下、快速、均匀涂布，厚度宜薄，一般要求控制在1mm以内；为保证接缝压密，可先穿束再涂胶，缩短涂胶后至张拉开始的时间，使胶接块件拼装完毕(检查合格)，即可张拉预应力钢材，进行块件挤压，接缝处的挤压力应大于0.2MPa，使接缝粘结良好； ⑧接缝加压被挤出的胶浆要及时(挤压完毕)清理刮净，防止预应力管道被挤出的胶浆堵塞；对每次使用的机(工)具亦应及时用溶剂清洗干净

第六节　悬拼预应力及悬拼质量的控制

一、悬拼预应力的控制

悬拼施工平衡与控制常以拼合面的应力为基准，以预应力控制为手段使拼合面对形心弯矩的总和为零最佳。拼合时环氧树脂所需的粘合压力亦应满足。

1. 弯矩总和为零的控制

梁段拼合面的受力状况如图4-3-12所示，n-n为梁段计算的拼合截面，截面倾角θ可近似认为与地平面垂直，即$\cos\theta\approx1$，$N_2\cos\theta\approx N_2$。

根据对拼合面形心总弯矩为零的原理则得：

$$\sum M_m = KGL_g + \sum P_i L_i + N_1 h_1 + N_2 h_2 = 0 \tag{4-3-2}$$

式中：M_m——对拼合面形心弯矩；

K——重力系数，按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)规定取$K=2$；

G——悬拼梁段重力；

L_g——梁段重心至拼合面距离；

P_i——各施工临时荷载重力；

L_i——各 P_i 至拼合面距离；

N_1、N_2——上、下缘临时预应力值；

h_1、h_2——N_1、N_2 至拼合面形心的距离。

施工时一般可先设定 N_2，再按上式求得 N_1。

2. 保证环氧树脂的粘合压力

拼合缝采用环氧树脂粘结时，施工工作压强 σ 不能小于 0.2MPa，通常按 $\sigma=0.3$MPa 控制。即：

$$\sigma=\frac{N}{A}\geqslant 0.3\text{MPa} \tag{4-3-3}$$

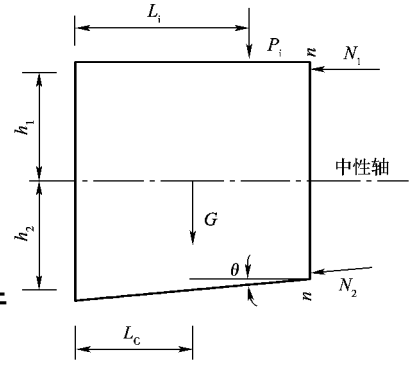


图 4-3-12　梁段受力分析图

式中：N——$N=N_1+N_2$；

A——拼合面面积。

3. 临时预应力的施工

临时预应力筋是拼合梁段连接和就位的手段，为便于施工操作也可选用高强精轧螺纹钢筋及其专用的接头和锚具作施工临时预应力筋。其孔道预留在顶底板专用。设置根数按规定计算选定，孔位按均匀对称原则布设。张拉的控制应力按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)有关规定取值。

二、悬拼质量控制

1. 预制场测量

建立基准三角网，选用平行于桥轴线的一直线作为控制中线，在预制场台座外控制中线放样。在梁段预制后，移运前，用控制中线在顶面上放出梁中线，并用最大的可能间距放出两条与中线垂直的横线。并在横线上测量 4 个固定点(每根横线取 2 个点)的高程，测定记录横线间距及 4 点高程值，供安装时使用。

2. 中线控制

悬拼时梁段的中线可能因为平面位移与平面转角而产生误差，为减小平面位移误差的叠加和传递，安装时可通过中线适当错位纠正。每次错位调节小于 3mm 为宜。

转角误差因梁段一般较短，中线上难以反映，可测量两梁段上横线是否平行判断。转角容许误差由合龙中线最大偏差确定。误差调整的办法是在一侧的腹板加垫金属板或刷厚环氧树脂。

3. 梁的高程控制

梁应按修正后的设计高程控制，修正后的高程已计入预制梁高误差(被测点梁的高度及混凝土的高低不平误差)。

$$H_{修正}=H_{设计}-H_f \tag{4-3-4}$$

式中：$H_{设计}$——按设计图纸查得的设计高程；

H_f——被测点梁高及混凝土面高低误差；

$$H_f=h-h'-\Delta h \tag{4-3-5}$$

h——被测点设计高程；

h'——被测点实际高程；

Δh——混凝土面高差；

$H_{修正}$——修正高程。

一般 $H_{修正}$ 可据预制场所测原始数据及 1 号梁段安装时测得的绝对高程推算：

$$H_{修正}=H_1+L_{i1}\tan\theta+\Delta h_{1i} \tag{4-3-6}$$

式中：H_i——悬拼 1 号梁段被测点的绝对高程；

L_{i1}——被测点与 1 号梁段基准点测得的距离；

$\tan\theta$——梁的计算转角，因 θ 值小，$\tan\theta\approx\theta$（θ 为弧度）；

i——被测点；

Δh_{1i}——i 点 1 号梁段基准点预制时高差；$\Delta h_{1i}=h_i-h_1$。

施工时，影响梁高程的因素较多：预制梁高误差、梁自重误差、临时荷载、安装时立面转角及预应力筋张拉误差等。上式中仅考虑主要的影响值，一般能满足施工精度要求。

梁自重误差一般在±4%内，可不计其影响。混凝土徐变因总的悬拼时间短，预制时间长，在施工期间内亦可不计。临时荷载值可由施工控制。

预应力筋张拉引起的高程变化情况可通过计算求得，根据影响的大小来决定是否修正。

悬拼过程中，应将各梁段测点的实测高程与按式(4-3-6)计算修正高程进行对照，对原设的 4 个基准点高程进行测量和计算，及时调整高程与转角。

竖向位移差可通过上下错动调整。每次可在 10mm 范围内竖向错动，也可通过设垫转角予以调整。

4. 悬拼的质量控制标准

①梁段安装的主要允许偏差

中线平面位置：±10mm。

平面转角：±1°/m。

高程：±10mm。

立面转角：±1°/m。

扭转：±10mm。

湿接缝后第一梁段中线：±2mm。

湿接缝后第一梁段顶面高程：±2mm。

②悬臂合龙的主要允许偏差

悬臂合龙的中线：±50mm。

悬臂合龙的相对高程：±50mm。

5. 合龙

悬拼完成后，T 构的合龙、体系的转换等可参见悬臂浇筑部分。

第四章 大跨度钢桁架桥施工

DISIZHANG

第一节 钢桥概述

一、我国钢桥修建历史简介

1. 解放前

解放前，我国钢桥多由外国人修建，由于列强各自为政，所以桥梁的标准、技术、器材均被其把持垄断，因而建成的桥梁标准比较杂乱，质量差。以下几座桥例可以说明之：

(1)郑州黄河桥，当时国内最长一座铁路桥(图 4-4-1)，全长 3015m，共 102 孔，跨度为 315m，下承钢桁梁与 21.5m 上承钢板梁组成，设计载重约合 E-35 级，由外国公司承建。

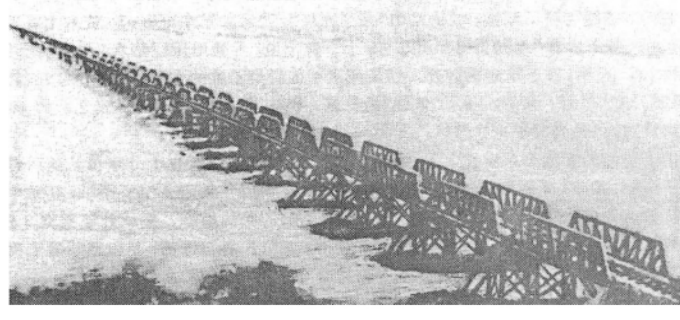


图 4-4-1 郑州黄河铁路桥

(2)泺口黄河桥，为当时最大跨度的铁路桥，全长 1255.2m，共 12 孔，主跨为 128.1＋164.7＋128.1(m)的悬臂梁(图 4-4-2)。载重相当于 E-35 级，由德国公司设计和监造。

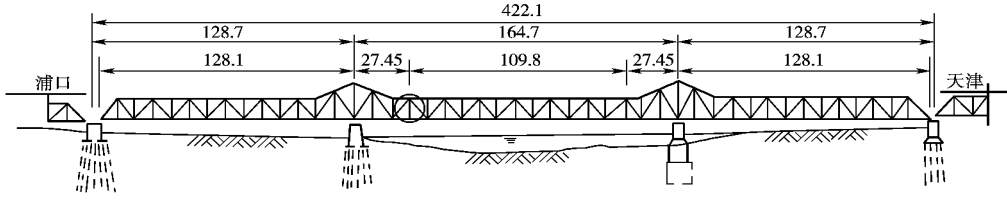


图 4-4-2 泺口黄河铁路桥(尺寸单位：m)

(3)丹东鸭绿江桥(图 4-4-3),全长 946.2m,共 12 孔,94.2m 及 62.5m 三等跨连续梁各二联,设计载重为 L-27 级,1943 年建成通车,由日本工程师主持修建。

图 4-4-3　丹东鸭绿江桥

(4)钱塘江大桥(图 4-4-4)是我国自行设计建成的一座现代化公铁两用桥梁,正桥全长 1072m,由 16 孔跨径为 65.84m(216 英尺)及 2 孔 14.63m 上承板梁组成,茅以升任钱塘江大桥桥工处长,罗英任总工程师,但各主要工程,还是由各洋行承包。

图 4-4-4　杭州钱塘江大桥

2. 解放后

新中国成立后,我国人民发扬自力更生的精神,桥梁建设事业蓬勃发展。我国自主修建的有代表性的钢桥主要有武汉,南京、九江、芜湖四座长江上的桥梁。这四座大桥都是公铁两用桥,铁路为双线,公路为四车道。

(1)武汉长江大桥(图 4-4-5),新中国成立后的 1950 年即着手兴建,正桥长 1156m,三联三等跨 128 m 的连续钢桁梁,公铁两用桥。钢梁的钢材是进口苏联的 CT3M(三号桥梁钢,屈服强度 240MPa),技术由苏联专家指导,主要的还是我国自己设计和建造,是我国自力更生建设现代化桥梁的开端。

(2)南京长江大桥(图 4-4-6),是 1958 年规划兴建,1968 年建成。正桥全长 1576 m,计 10 孔,3 联 3×160 m 连续钢桁梁桥加一孔 128 m 简支梁,钢材为屈服强度 350 MPa 低合金钢。

该桥钢材是在新中国成立后不久,国家经济薄弱,钢材产量很低,制造设备严重缺乏的情

况下为本桥开发的。

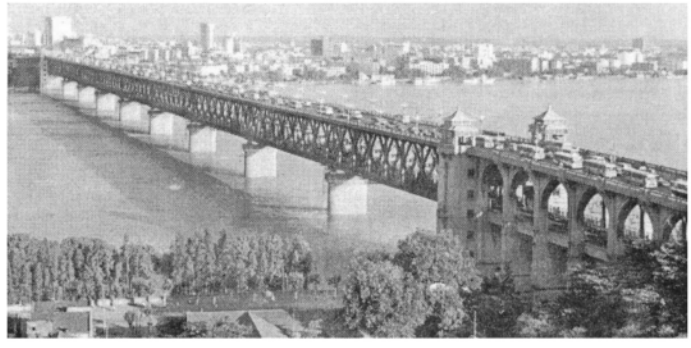


图 4-4-5　武汉长江大桥

图 4-4-6　南京长江大桥

武汉、南京两座长江大桥钢梁均是铆接的。

(3)九江长江大桥(图 4-4-7),正桥全长 1806.7m,主跨 180+216+180(m)的刚性桁梁柔性拱,专门开发了 15 锰钒氮桥梁钢(15MnVNq),焊接构件最大板厚达 56mm 及材质 35VB 的大直径高强度螺栓,建成了双线铁路、四车道公路最大跨度达 216m 的栓焊梁,也是少焊多栓。此后钢桥开始全面采用栓接。

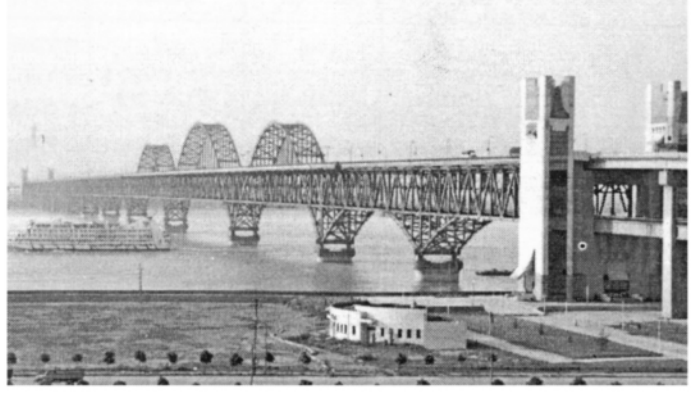


图 4-4-7　九江长江大桥

(4)芜湖长江大桥(图 4-4-8),正桥全长 2193.7m,主跨为 180+312+180(m)矮塔斜拉桥,

加劲梁为钢筋混凝土板与钢桁梁结合共同受力的结合钢桁梁，开发了综合性能优异的 14 锰铌桥梁钢(14MnNbq)，实现了厚板(50 mm)焊接整体节点的栓焊梁，达到了多焊少栓的焊接桥梁，为全焊无栓的铁路桥梁打下基础。

图 4-4-8　芜湖长江大桥

因受飞行净空的限制，桥塔高度受到限制，如果是高塔，跨度可以增大。所以这种体系的桥梁，增大跨度留有很大空间。

二、钢桥的主要特点及使用范围

钢材是抗拉、抗压和抗剪强度均较高的匀质材料，因此钢桥具有很大的跨越能力，且结构可设计得相对比较纤细。

钢桥的构件适合用工业化方法制造，便于运输，工地安装速度快，因此施工工期较短。

钢桥在受到破坏后，易于修复和更换，适宜于战备和灾害恢复的快速抢修。

钢桥易于腐蚀，因此需要经常检查和定期喷涂防腐涂料，近年来虽然研究出了一些长效的涂料，但价格也比较昂贵，因此钢桥的养护费用比其他桥梁较高。

三、桥梁用钢材的主要性能

1. 钢的强度性能

如图 4-4-9 所示，桥梁用钢的强度有三个主要指标：一是弹性极限 σ_e，拉伸试件在卸载后没有残余变形，加载过程中出现的应变也很小。二是屈服强度 σ_s(也称为屈服点)，当应力在弹性极限与屈服极限之间时，试件开始出现塑性变形，卸载后有残余变形；当应力达到屈服强度时，应力即使不再增大，应变却会继续扩大到一定程度(约为 2%)。三是极限强度 σ_b，当应力达到 σ_b 时，试件就被拉断。

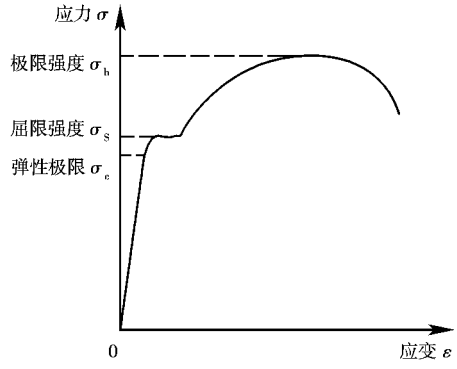


图 4-4-9　拉伸应力应变曲线

桥梁结构要保持正常运营，就必须使钢杆件的应力在弹性极限 σ_e 以下，所以设计应力必须小于弹性极限。但由于钢材弹性极限不易准确测量，而弹性极限与屈服强度又很接近，故工程上一般采用屈服强度代替弹性极限作为桥梁用钢构件的应力控制标准，并采用一定安全系数来确定桥梁用钢的容许应力。桥梁常用钢材的容许应力如表 4-4-1 所示。

桥梁用钢的基本容许应力　　表 4-4-1

序号	应力种类	单位	钢材钢号					
			16q	14MnNbq 16Mnq	15MnVNq	ZG25II	ZG35II	35 号锻钢
1	轴向应力[σ]	MPa	135	200	250	—	—	—
2	弯曲应力[σ_w]	MPa	140	210	260	130	150	220
3	剪应力[τ]	MPa	80	120	150	80	90	110
4	端部承压(磨光顶紧)应力	MPa	200	300	370	—	—	—
5	销孔承压应力	MPa	—	—	—	—	—	180
6	辊轴(摇轴)与平板自由接触的径向受压	kN/cm	—	—	—	0.55d	0.61d	0.60d
7	铰轴放置在铸钢铰轴颈上时的径向受压	kN/cm	—	—	—	—	—	8.4d

注：1. 表列 16Mnq 的容许应力是同屈服点 340MPa 相对应；如按治标规定，由于厚度影响，屈服点有变动时，各类容许应力可按屈服点的比例予以调整。

2. 辊轴(摇轴)与接触的平板用不同钢种时，径向受压容许应力应采用其较低者。

3. 表中符号 d 为辊轴、摇轴或铰轴的直径，以厘米计。

4. 序号 2 中直接搁置桥枕的桥面系纵梁的弯曲容许应力[σ_w]采用[σ]。

5. 序号 7 系按接触圆弧中心角为 2×45°考虑；条件不符时可另行确定。

由于桥梁运营中受力情况的复杂性，桥梁结构的某些杆件可能出现未曾考虑的应力，特别是在动荷载的作用下，如果钢材的极限强度 σ_b 与屈服强度很接近，就可能使桥梁结构发生局部断裂的危险，因此，一般要求屈服强度与极限强度的比值 $\left(\frac{\sigma_s}{\sigma_b}\right)$ 不宜过大，一般保持在 0.6～0.75 之间。

2. 钢的塑性及韧性

荷载作用下的钢材，若在断裂前产生较大的塑性变形，则称此钢材具有延展性，或称此钢材具有塑性。

钢材的塑性常用静力拉伸试验中的延伸率和断面收缩率来衡量。若试件的原标距长度为 l_0，而 Δl 为断裂时的总伸长量，则其延伸率 δ 可用下式求得：

$$\delta=\frac{\Delta l}{l_0}\times 100\% \tag{4-4-1}$$

由于延伸率与试件的尺寸有关，除应规定试件的标距长度外，还应规定标距长度 l_0 与试件原直径 d_0 之比值。当 $l_0/d_0=5$ 时，其延伸率以 δ_5 表示；若 $l_0/d_0=10$，则以 δ_{10} 表示。

塑性良好的钢材，不仅使钢结构在破坏前产生较大的变形，形成结构物破坏的预兆，容易引起人们的注意；而且塑性与韧性有关，塑性良好的钢材，常常韧性也较好，因此对桥梁用钢的延伸率应加以规定。

钢材的冷弯试验，是从另一个方面来揭示钢材的塑性，它反映了钢材的冷加工性能。冷弯试验通常用宽度等于两倍厚度的钢板条作试件，将试件冷弯 180°，弯心直径 d 等于 1.5a、2a

或 $3a$(a 为试件厚度)。若试件冷弯后,弯曲处的外表及侧面无裂缝或分层现象,则认为合格。冷弯性能较好的钢材,有利于制造,故桥梁用钢需进行冷弯试验。

钢材的韧性是指钢材破坏前所吸收的机械能量。若外载施予钢材的机械能量没有其他方面的损失,则钢材的韧性可以认为是钢材破坏所需要的能量。单向拉伸试验所得出的应力-应变图(图 4-4-9),在曲线下的总面积,能表达单向拉伸情况下的韧性,但不能反映复杂应力状态下的韧性。目前,我国是以冲击韧性试验中的冲击能量来衡量钢材的韧性。

3. 钢的脆性断裂

钢结构在静力或加载次数不多的动荷载作用下发生断裂,这种断裂简单地可分为两类:一种是断裂前构件有较大的变形,例如单向拉伸试杆的断裂(低炭钢),就是属于这一种,这种断裂称为塑性断裂(或称韧性断裂);另一种断裂,是断裂前构件变形甚小,裂缝开展速度甚快(可达 1800m/s),断裂发生突然,这种断裂称为脆性断裂(简称脆断)。

从微观考察及断口外貌观察可知:钢材的塑性断裂表现为材料晶粒内部在剪应力作用下发生永久相对位移以至最后断裂。断口面与剪应力方向平行,断口呈纤维状,色泽灰暗,不能反光。而钢材的脆性断裂表现为材料晶粒在拉应力作用下断裂,断口面与拉应力方向垂直,断口能反光,晶粒状的外观明显。

若从力学观点来分析,钢材的塑性断裂是由于剪应力超过晶粒抗剪能力而产生,而脆性断裂是由于拉应力超过晶粒抗拉能力而产生。故若剪应力先超过晶粒抗剪能力,则将发生塑性断裂,若拉应力先超过晶粒抗拉能力,则将发生脆性断裂。因此,钢材是发生塑性断裂抑或脆性断裂,它和剪应力与拉应力的比值有关。在多向拉应力的情况下,最大剪应力与最大拉应力的比值,要比受单向拉应力时为小,因此,多向拉应力的应力状态是引起脆断的一个重要因素。

钢材的脆断与其韧性有密切关系,韧性不好的钢材,在不利条件下(例如低温及快速加载等),有可能使钢材发生脆断,因此常用冲击韧性来判断钢材的脆断倾向。

钢材的冲击韧性与温度有关,在低温时,冲击韧性将显著下降。

冷加工对钢材的抗脆断性能也有影响。冷加工降低塑性,因而也降低冲击韧性。钢材经冷加工后,在室温下放置一定的时间,或在较高的温度(100～300℃)放置较短的时间,钢材的强度与塑性将产生变化,它的冲击韧性将有所下降,钢材性质的这个变化过程称为机械时效。常用的机械时效处理方法是:将钢材拉伸到塑性变形 10%,然后在 250℃人工时效一小时,随后在空气中冷却。经过机械时效后的钢材冲击韧性将显著降低,故桥梁钢也要求做时效后的冲击韧性试验,以判断钢材在时效后的抗脆断性能。

影响钢材的抗脆断性能的因素很多,除上面提到的外,还有:

(1)钢材的抗脆断性能与加载速度有关。加载速度愈高,钢材愈容易发生脆断。

(2)钢材的抗脆断性能与钢材的化学成分有关。含碳较多的钢材,共抗脆断性能将有所降低。

(3)试件的大小也影响抗脆断性能。厚钢板比薄钢板较易脆断。

(4)残余应力对抗脆断性能也有影响。低温下发生低应力的脆断,常与残余应力有关。

(5)焊接工艺也影响钢材的抗脆断性能。离焊缝近的过热区,其冲击韧性将显著下降。例如,16Mn 钢的角焊缝接头的过热区,其在 $-20°C$ 的冲击韧性试验得出的冲击能量,比母材要低得多,某些试验数据表明降低值共达 30%左右。

4. 钢的疲劳强度

疲劳破坏的概念:拉伸试件在静载作用下,当应力达到极限强度 σ_b 时,试件才会被拉断。

若试件所受的荷载是变化的，时大时小，或时而受拉，时而受压，在这样的荷载多次反复作用下，即使试件的最大应力低于极限强度 σ_b，甚至低于屈服强度，试件也可能破坏，这种破坏是一种突然的脆性断裂，通常称为疲劳破坏。

钢构件的疲劳破坏形成过程是：首先在构件中开始形成微观裂纹，由于裂纹根部的应力集中而使其逐渐扩展，削弱了构件的截面，在反复荷载作用下，最后发生突然的断裂。

四、钢材的可焊性

焊接钢结构，其焊缝及与焊缝相邻的基本钢材（热影响区），在施焊过程中，往往易于产生裂缝，在构件使用过程中，也易发生脆断现象。

由于焊接时的高温作用，焊缝及热影响区的钢材，在冷却后内部组织发生变化，力学性能也随之有所改变，一般是钢材的塑性与冲击韧性下降；同时，焊接后常留有残余应力，再加上焊缝本身的某些缺陷（如气孔、裂纹、夹渣、根部未焊透等），使焊接钢结构易于发生裂纹与脆断。

要避免发生裂纹与脆断，应注意下列三点：

（1）选用适宜于焊接的基本钢材、焊条（焊丝）及焊剂。

（2）选用适当的焊接方法和焊接工艺。

（3）采用合适的结构形式。

第二节　钢桁架桥的杆件制造

由于钢桁架桥是在工厂制作杆件或构件，运送到工地进行安装的，所以，精确的工厂制造是其顺利建设的重要前提。工厂加工应以设计图为依据，绘制制造详图和钢桥的制造工艺设计准则。为使钢桥制造满足设计技术要求及有关规范规定，同时还要适应工厂生产条件和工艺技术水平。一般设计制造工艺时应达到如下要求：确保钢梁重要焊缝强度和韧性要求；传剪焊缝采用俯位焊接；保证各构件和节段焊缝质量优良，各节段端口尺寸误差最小；尽量批量生产，减少专用设备的投入，降低制造费用，提高经济效益。钢桥的制造加工包括下列工艺过程：作样、号料、钢料切割和矫正、号孔和钻孔、杆件组装、焊接、结构试拼装、除锈和油漆、包装与运输等。

一、样板与样条

样板是由一块薄铁皮制成的板，其外形尺寸和实物一样，有些样板上面钻有小眼孔，以示出螺栓孔位置。样条是一条带形的薄铁皮，上面标志有杆件的切割线及栓孔位置。对于节点板等重要部件，还有机器样板。

样板和样条应准确无误，按施工详图作样后，还要对照钢桥设计图复核。并应标注有关内容：产品名称、杆件编号、钢料类别、栓孔直径、预留量等。

二、号料和号孔

利用样板、样条可以在钢材上把零件的切割线划出，称为号料。号料使用样板、样条而不直接使用钢尺，这是为了避免出现不同的尺寸误差，而使钉孔错孔。号料的精确度应和放样的精度相同。号孔是利用样板或样条，用样冲在钢料上打上冲点，以表示钉孔的位置。如果采用机器样板则不必进行号孔。

三、钢料切割和矫正

钢料的切割方法有剪切、焰切、联合剪冲和锯切四种。

剪切是使用剪切机进行的，对于 16Mn 钢板，目前可切厚度在 16～20mm。

对于剪切机不能剪切的厚钢板，或因形状关系不能使用剪切的板材都采用焰切。焰切分手工切割、半自动切割和自动切割机切割。

联合剪冲用于角钢的剪切。锯切主要用于对槽钢、工字钢、管材及大型角钢的切割，锯切的工具为圆锯机。

由于钢材的轧制、运输、切割等过程中可能会产生变形，因此需要进行矫正。矫正分为冷矫和热矫两种。对于钢板和角钢常采用冷矫，即采用辊压机来赶平或调直。对于切割后呈马刀形弯曲的料件，当宽度不大时，可以在顶弯机上矫正。对于宽厚钢板的马刀形弯曲，则一般采用热矫，即用火焰加热进行矫正，火焰温度应控制在 600～800℃范围内。

四、钻　　孔

钻孔的发展过程为：划线钻孔；护孔套钻；机器样板钻孔；数控程序钻床钻孔。

样板亦称机器样板。样板是在厚 12～20mm 的钢板上，按照孔眼设计位置，精确地嵌入经过渗碳淬火处理的钢质钻孔套。钻孔套是旋制的，硬度比钻头大 2°～3°洛氏硬度级。钻孔套直径公差只有±0.05mm，孔心距公差为±0.25mm。钻孔时将机器样板覆盖在要加工的部件上，用卡具夹紧，钻头即通过钻孔套钻制加工部件的安装孔。用样板钻出的孔，精度高而划一，并可省去号孔工作。

使用机器样板钻孔可以使杆件达到互换作用，但对于不同规格的单构件则不能使用同一样板来钻孔，如钉孔排列不同或钉孔的间距不同。因此，设计者应尽量使结构物的设计标准化、模数化以减少机器样板的数量，提高机器样板的利用率。

用数控坐标式钻床钻孔可达到很高的精度，也可以使工字型杆件的工地栓孔一次钻成。

五、组 装 杆 件

栓焊钢梁的主桁杆件截面形式大多数为 H 形。H 形杆件的组装是在胎型上进行的，为了便于进行定位焊，组装胎型最好是转动式。

为了保证组拼质量，对组成杆件的各零件的相对位置、相互间的密贴程序以及整个杆件的外轮廓形状和尺寸，在组装过程中均要进行检查。

六、焊　　接

钢桥采用的焊接方法有自动焊、半自动焊和手工焊三种。

对于焊接工艺应进行评定试验，按照《铁路钢桥制造规则》规定，对要施焊的钢桥构件所采用的焊接方法、焊接材料、焊接位置，钢桥制造工厂应进行一系列的工艺试验和评定，如对埋弧自动焊、CO_2 气体保护焊、手工焊、陶质衬垫 CO_2 气体保护单面焊双面成型等多种焊接连接形式，几十种焊缝形式的焊接，都要选出合理的焊接工艺参数，保持较高的工艺水平。对于焊接单元件、节段以及工地接头工艺应有以下几项严格要求：焊接方法、焊接材料、焊工资质、缝口清理、定位焊、产品试板、焊接程序、焊接质量检验等。

在零件正确顶紧就位后，即可进行定位焊。定位焊的焊缝长度每段为 50～70mm，各段之

间距离大的可以大于 600mm。

焊接质量在很大程度上决定于施焊状况。施焊位置有：俯焊、仰焊、平焊等。焊接时所采用的材料品质、机具胎型的质量、电流强度、电弧电压、焊丝的输送速度及焊接速度等也都直接影响焊接质量。

焊接完毕后应检查焊缝质量。焊缝中主要缺陷有：裂缝、内部气孔、夹渣、未溶透、咬边、溢流、烧穿及焊缝尺寸不合规定等。对于所有的焊缝均应进行外观检查。内部检查以超声波探伤为主，若仍有疑问，可用 x 或 γ 射线透视进行检查。当杆件施焊后会产生不同程度的焊接变形，如 H 形杆件，会产生盖板不平以及蘑菇状变形、腹板弯曲、杆件扭曲、马刀形弯曲等，可在施焊前对构件进行预弯以抵消焊接变形，或在特制胎型内焊接，也可用机械法或火焰加温矫正。

七、结构试拼装

栓焊钢梁某些部件，由于运输和架设能力的限制，必须在工地进行拼装。

运送工地的各部件，在出厂之前应进行试拼装，以验证工艺装备是否精确可靠，如钢桁梁桥试拼装按主桁、桥面系、桥门架及平纵联四个平面进行。试拼装时，钢梁主要尺寸如桁高、跨度、上拱度、主桁间距等的精度应满足有关标准的要求。新设计的以及改变工艺装备后制造的钢梁，均应进行试拼装，对于成批连续生产的钢梁，一般每 10～20 孔应试拼装一次。

八、钢桥的除锈、油漆和运输

钢桥的各零部件在油漆之前，表面的氧化铁皮、铁锈、湿气及油脂等均应进行清除。常用的钢料除锈方法为：打砂、喷铁丸、机械外力除锈法，即铁丸直径为 $\phi 0.2 \sim \phi 1$mm。化学除锈酸洗法，酸洗是利用酸溶液与金属氧化物的化学反应，除掉钢料表面的氧化铁皮和铁锈。

对于除锈后的钢桥构件，应涂以两度防锈底漆使钢材表面与空气隔绝以防再锈蚀。在栓焊钢构件的工地安装螺栓孔部位、节点板和拼接板，则应涂以能保证摩擦系数的防锈涂料，漆膜总厚度为 18μm。对于城市及大气污染严重地区的钢桥，也可用热锌、热铝喷涂工艺进行防护，或用氯磺化聚乙烯涂刷，其厚度不小于 140μm；或用改性环氧树脂胺等防护涂料。当钢桥在工地悬臂安装以后，可再涂两度面漆防护，重要部位应涂三度面漆防护。

当钢桥构件在工厂制造完毕，并涂完底漆后，应对钢构件编号，连同钢桥施工图、拼装简图，发送杆件表及工地螺栓等一并运往工地。

近些年来，随着桥梁向“长跨、轻质、高强、整体”发展，钢桥的制造技术、工艺水平也在迅速提高。目前，钢桥的制造技术发展的主要特点是：

(1)普遍应用电子计算机进行计算机辅助设计(CAD)和绘图(CADD)系统的开发。用精密切割代替刨铣机械加工，用高效切割、自动碳弧气刨开坡口，将光电跟踪技术运用于切割、放样、划线等工序。

(2)先进的检测手段。目前常用的 x 射线焊缝探伤仪已发展为轻便式，可在杆件上直接探伤，全力提高钢梁焊接接头的强度。

(3)改进除锈涂油方法和组装成型工艺。

第三节　钢桁架桥的悬臂拼装施工

钢桁架桥的悬臂拼装施工，主要有下列程序：杆件地面预拼、钢梁杆件悬臂拼装、高强螺栓施工、安装临时支承装置、钢梁纵移和横移等。

一、杆件预拼

杆件预拼是在施工场地布置的预制场内进行。通常是在靠近桥址中线的上游侧或下游侧。预拼场最好为一块平地，场内布置一定的杆件堆放场地和预拼台座。按照操作方便的要求配备吊机走道。龙门吊机走道互相重叠，以便进行杆件横向倒运。龙门吊机下铺设标准轨距线路两条，以便接运发来杆件和向桥上发送预拼好的杆件。除龙门吊机外，预拼场还应配备轨道吊机、汽车吊机等。

由桥梁工厂按材料发送表发往工地的都是单根杆件和一些拼接件，为了减少拼装钢梁时桥上的高空作业，减少吊装次数，通常将各个杆件预先拼装成吊装单元，把能在桥下进行的工作尽量在桥下预拼场内进行，以期加快施工进度，安全生产。

预拼场的主要工作有：杆件油漆；弦杆与拼接板的预拼；两片纵梁组合的预拼等。而工作量大而又琐碎的是弦杆与拼接板的预拼。

1. 杆件油漆

由工厂发送来的杆件已涂二层底漆，通常是红丹漆。在预拼场内还要涂三层面漆，目前常用的是灰铝锌醇酸磁漆。油漆好的杆件应分类，按节间及拼装次序排列堆放。

2. 杆件预拼

杆件预拼前应绘制预拼图。清楚准确地标明哪些是预拼场应拼的钉(栓)，哪些是桥上才上的钉(栓)，并注明不同部位的使用的钉(栓)型号。

预拼工作均在拼装台座上进行。台座的间距和高度应方便工作。台座布置如图 4-4-10 所示。

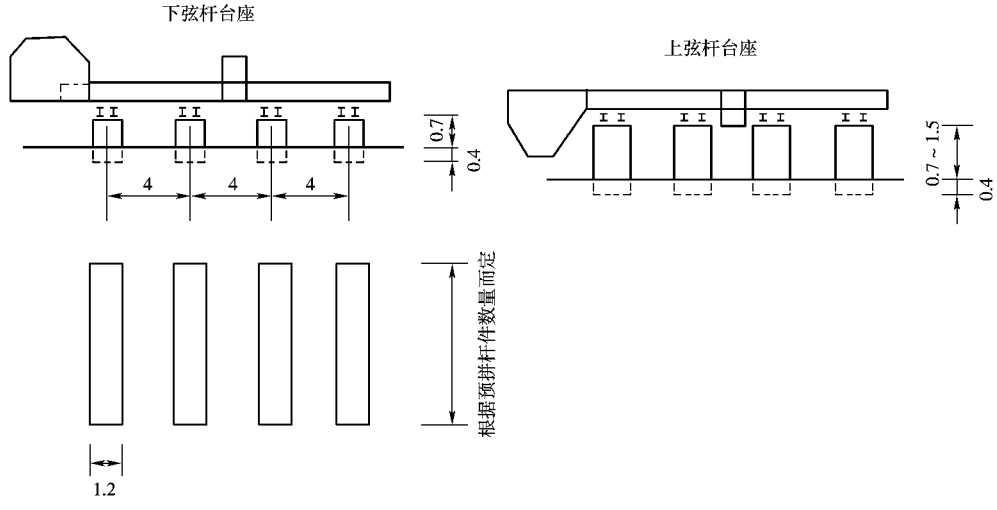


图 4-4-10　预拼台座布置图(尺寸单位：m)

3. 预拱度的设置

在预拼工作中如遇弦杆节点设置预拱度转角，应仔细核查认可后才可栓接。预拱度转角是指因预拱度要求在节点板中心线两侧的弦杆螺栓孔的钉线与水平线所成的微小转角，放大后如图 4-4-11 所示。关于预拱度的设置，桥规规定应按(恒载＋1/2 静活载)形成的挠度曲线设置。在制造钢梁时这种预拱度的形成是利用在上弦大节点处一些节点伸长和另一些节点缩短来构成的。

预拱度转角的形成有以下两种做法：

(1)随着预拱度在全桥的大小变化，使此 α 转角在工厂制造节点板钻孔时，使钉孔线钻成斜排即形成。这种方法对工地拼装比较方便，但桥梁厂需增加钻制斜排钉孔的机器样板，这增加了制造的复杂性。

(2)此 α 转角在工厂可不必做，即节点板钉线可以做成水平的，α 转角由工地拼装时通过钉孔与冲钉的径差即错孔来形成。目前使用冲钉为 ϕ25.7mm，钉孔为 26.2mm，容许错孔为 (26.2－25.7)/2＝0.25mm。

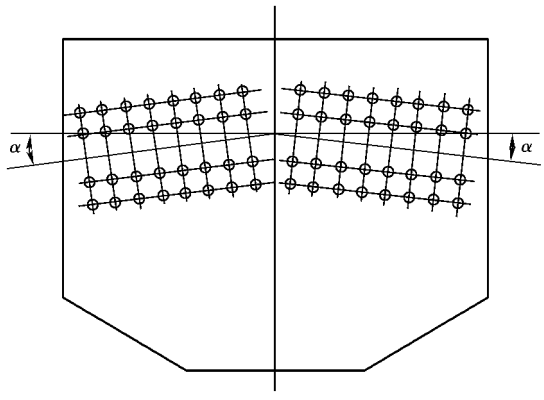


图 4-4-11　预拱度设置示意图

为了方便起见，现场把钢梁各部分杆件名称，分别用该杆件名称的拼音字母的第一个字母来代表，如表 4-4-2 所示。

组拼构件表　　表 4-4-2

杆件	发送号	件数	单件重 (kg)	共重 (kg)	附　注
E_4　E_6 (E_2　E_4)	X^Z	1	10019.00	10019.00	杆件总重为：13.54t＋0.4t(脚手重)＝13.94t　e＝1.98m(e 为杆件重心距杆件中点的偏心距)
		1	141.4	141.4	
		1	97.6	97.6	
		2	5.2	10.4	
		1	40.1	40.1	
		1	87.5	87.5	
		1	97.3	97.3	
		1	97.3	97.3	
		2	928	1856	
		2	185.5	371	
		4	44.2	176.8	
		4	68.4	273.6	
		4	33.6	134.4	
		1	38.8	38.8	
		2	8.8	17.6	
		1	83.2	83.2	
		1	46.5	46.5	
		1	46.5	46.5	

对于每一个节点的组拼，均应预先做好组拼表，标明该节点杆件的组成，并配合螺栓记图进行预拼。

二、钢梁杆件拼装

由预拼场预拼好的钢梁杆件经验查认可合格后，即可按拼装顺序先后运至提升站，由提升

站吊机，再由龙门吊机或爬行吊机把杆件提运至在钢梁下弦平面运行的平板车上，由牵引车运至拼梁吊机下拼装就位。拼梁吊机通常安放在上弦，遇到上弦为曲弦时，也可按放在下弦平面。

钢梁拼装必须按一定的拼装顺序图进行，如图 4-4-12 所示。在拟定拼装顺序时应考虑下面的主要问题：

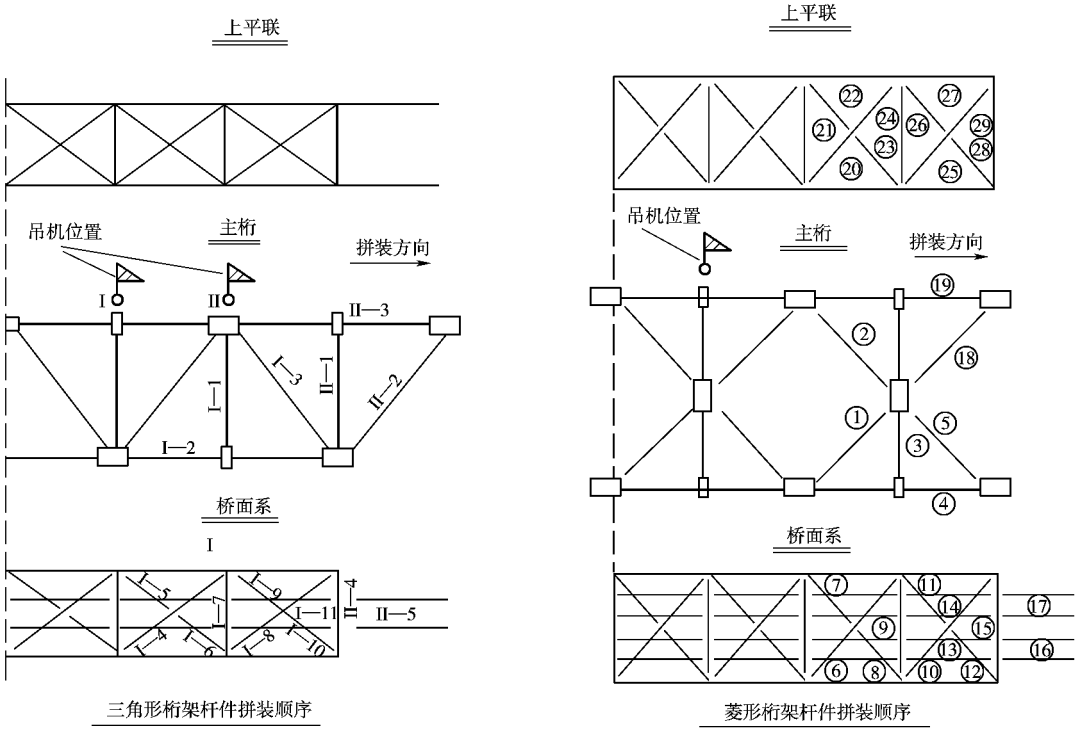


图 4-4-12　钢梁桥拼装顺序图

(1)拼梁吊机的性能，如使用方法、起吊能力、最大吊距等。

(2)拼装时，应尽快将主桁杆件拼成闭合的三角形，形成稳定的几何体系，并尽快安装横联结体系，保证钢梁结构的空间稳定。

(3)先拼装的杆件不应影响后拼装杆件的安装施工与吊机的运行。

(4)主桁杆件拼装，应左右两侧对称进行，防止偏载的不利影响。

(5)应对有些特殊的拼装引起注意，如钢梁第一个节间的纵梁伸出时，将使端横梁受扭，而横梁抗扭刚度又较差。因此，在拼装纵梁时，应用钢丝绳把纵梁吊于上平联，待前面第二根横梁装上后，即可解除此吊点。

伸臂拼装第一孔钢梁时，根据悬臂度大小，需要一定长度的平衡梁，并应保证倾覆稳定系数不小于 1.3。平衡梁通常是在路堤上或引桥上满布膺架上进行拼装。为了悬臂架设钢梁的需要，需保持路基或引桥上的线路直通悬臂孔。此时，路基或引桥占据了平衡梁的桥面系的空间，妨碍平衡梁的桥面系及下平纵联的安装，若是平衡梁将形成一个倒置的敞口式桁梁，这不但会影响平衡梁的总体稳定，而且还会影响平衡梁受压下弦杆的稳定。特别是有些杆件，是按拉杆设计，而此时却要承受压力，这对杆件的受力是不利的。因此，这些问题必须引起重视，此时平衡梁应按半穿式桁梁进行检算，必要时采取临时措施，以增强结构的稳定性。目前常用的

办法，一种是增加临时撑杆，给下弦杆以侧向支撑；另一种是在墩台上加设临时稳定结构，把下弦杆卡住，以防发生事故，如图 4-4-13 所示。

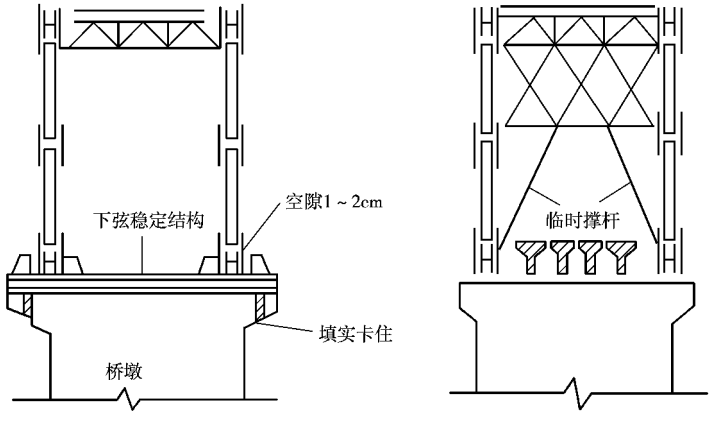


图 4-4-13　平衡梁临时加固措施

当平衡梁的重力不足以抵抗倾覆稳定的需要时，可在平衡梁的尾端辅以压重，如水箱、砂箱、钢梁杆件及其他重物。

在拼装工作中，冲钉和螺栓应上足，对未拧螺栓的节点应尽量少受力，以保证设计的预拱度的实现。还特别应注意要随着钢梁拼装的进行，随时测量钢梁的立面和平面位置是否正确，钢梁安装偏差的容许值参见《铁路钢桁梁拼装及架设施工技术规则》。

三、高强螺栓的施工

我国于 20 世纪 60 年代开始在钢桥中使用高强螺栓的连接方法。1961 年底，我国架设了第一跨栓焊钢桁梁，跨长 41.62m，首次采用了 ϕ22mm45 号中碳钢高强度螺栓。1964 年底又架设了第二跨栓焊桁梁，跨长 61.44m，钢梁为 16Mnq 钢，工地连接用 40 硼高强螺栓。以后在铁路和公路钢桥施工时，广泛使用高强度螺栓进行栓焊连接，逐渐淘汰了铆接连接方式。

在高强螺栓施工中，我国常用的控制螺栓预拉力的方法是扭角法和扭矩系数法。安装高强螺栓时应保证各螺栓中的预拉力达到设计规定值，防止出现超拉和欠拉情况。

(1)连接件的防护及要求

在高强螺栓连接范围内，钢梁在制造时，已做了喷锌或涂以固化无机富锌漆的处理。这种防护既有防锈蚀作用，又可保证具有一定的摩擦系数的作用。因此，在钢梁运输和组拼时应仔细防护避免磨损，并避免与油脂、污物接触。组装前应用高压无油风将面上的积尘吹掉并用软铜刷刷去残存的污物。必要时以帆布遮盖，以防日晒雨淋。

在拼装中，用冲钉来固定螺栓孔的位置，用高强螺栓作拼装螺栓以初步夹紧钢板层。其数量应按施工工艺规定，一般是各选其半。拼装时应注意不使锌、漆层碰伤。为了在拧螺栓时减少螺栓和螺母间摩擦阻力，可在螺母的螺纹和支承面上涂少许黄油而严禁涂机油。螺栓头及螺母侧均置以垫圈，以扩大支承面积及不使钢板面因拧动螺母时而被擦伤。安装冲钉及高强螺栓后，被连接钢板表面之间应达到密贴，用 0.3mm 的塞尺不得深入 20mm。

(2)高强螺栓的初拧与复拧施工

初拧时通常使用长 55cm 以 45 号钢制造的短扳手。如套筒扳手、套口扳手、开口扳手等。由一个人以下压姿势将高强螺栓逐个拧至拧不动为止。由试验得知，对于 ϕ22mm40 硼高强

螺栓用这种方法初拧，预拉力达 5～7t。也可采用扭矩为 300N·m 的短扳手。在拧紧时应从节点中心向四周扩散逐个拧紧。这样，可使节点板平整、密贴。

值得注意的是，在初拧时，后拧的螺栓将会使附近先拧的螺栓预拉力降低，为此，需在初拧后再按同样方法复拧一次，以保证节点中螺栓预拉力大致相同。

(3)高强螺栓的终拧施工

复拧后，开始终拧。在目前，我国常用扭角法进行终拧。这种方法的原理就是：根据设计预拉力(对于 ϕ22mm 的 40 硼高强螺栓通常是 200 kN)以及螺栓连接的板层厚度，应从复拧位置再使螺母螺栓相对转动一个多大角度，使板层更加扣紧从而达到螺栓的预拉力。为此，需在复拧合格后的螺栓上用红油漆在螺杆端面上经螺母端面直到被连接钢板上划一细线，作为转动角度的起始线，然后用扳手使螺母与螺栓相对转动一个设计角度，即可达到设计预拉力。根据某些试验结果，得出终拧角度如表 4-4-3 所示，可供参考。

高强螺栓终拧角度表　　表 4-4-3

被连接钢板的层数	二	三	四	五
表面做喷锌处理的终拧角度	45°	60°	70°	70°
表面涂无机富锌漆的终拧角度	60°	70°	80°	90°

在拧紧螺栓时，应严格遵守施工工艺要求，准确地使螺栓达到预拉力。既不要“超拧”，使螺栓预拉力超强而致螺栓容易断裂；又不能“欠拧”，使螺栓达不到预拉力，因而降低了连接的强度，同时还导致节点处交汇的杆件容易松动，产生相对位移，影响钢梁的预拱度，使线路不平顺，影响运营质量。

高强螺栓终拧时，如没有机械设备，可用长 160cm 的长扳手，用人工拧紧螺栓。但劳动强度很大，施工进度慢，在高空作业时也不安全。因此，目前常用的是风动扳手或电动扳手。风动扳手使用广泛，操作方便，常被用来作为终拧工具。

(4)高强螺栓施工质量的检查

检查螺栓时多用扭矩系数法，如：

$$M=k\cdot N\cdot d \tag{4-4-2}$$

式中：M——拧紧高强度螺栓所需的扭矩值(N·m)；

k——扭矩系数(按试验的数理统计值)；

N——设计预拉力(N)；

d——螺栓的公称直径(mm)。

检查用的扳手多用带定钮装置的示功扳手和灯光扳手。示功扳手是利用百分表测量扳手受力的变形以此确定扳手施给螺栓的扭矩值。这种扳手使用前必须校正，标定施工扭矩值与扳手变形的关系。灯光扳手内装干电池和灯泡，当扳手加到所需要的扭矩时，扳手变形使之与测力螺杆接触，电路接通，灯泡发亮。目前还有使用带响定扭扳手，当扳手达到一定扭矩值时会发出微微响声，但制造成本高。

检查时，在确定需要检查的螺栓后，先在螺栓杆与螺母相对位置划一细线，作为标志。然后将螺母拧松 30°～50°，再用示功扳手(或灯光扳手、带响板手)将螺母拧回至原位置。此时观察扳手指示装置扭矩值是否达到所规定的数值，不足者拧足。每节点检查数量约为 5%。为了防止雨水及空气中潮湿气浸入被连接处的板缝内而引起钢板的锈蚀，在螺栓全部拧紧合格后，应用油灰腻子抹缝封住。并进行油漆，保证螺栓连接处的防锈蚀。

随着焊接技术的日趋完善和成熟，工地悬拼施工时，用焊接拼装成全焊钢桁梁和钢箱梁的

钢桥已经使用，预计将会是钢桥工地连接的主要工艺。全焊钢桁或箱梁，可减少节点板、拼接板等部件，并减轻钢梁自重，也便于钢梁的维修与养护。

四、安装时临时支承的布置

钢梁拼装过程中，需要经常调整支点处的高程差来控制钢梁梁端的挠度，使能满足运料道的安全下坡度和使梁端达到前面的墩台上的要求；在架梁时要随时变换支座，使固定支座换到反力最大的支点处；全桥的应力调整、横移、纵移以及永久支座正式就位等均要经常顶落钢梁和变换临时支承。这些工作程序繁杂、工程量比较大而工作面又窄小，因此合理地布置墩顶上的临时支承，有秩序地安排好顶落梁及纵移、横移工作，将使钢梁拼装进度加快，确保安全和减轻许多体力劳动。

(1)临时支承主要类型。

①临时活动支座是在千斤顶下放置辊轴形成。

②临时固定支座即由钢垫块，或工字钢束、钢轨束垒成。

③永久活动支座和永久固定支座由桥梁工厂用 25 号铸钢制成。

(2)临时支承的互相转换。

临时活动支座、临时固定支座、永久活动支座、永久固定支座、保险支座、接引支座等支座随拼梁阶段变化与作业程序的变化将互相更换交替使用。

把永久活动支座的滚轴四角上下用硬木楔紧，旁边用槽钢固定，槽钢再用交叉的 ϕ28 圆钢焊紧即可变为临时固定支座，如图 4-4-14 所示。

临时固定支座和临时活动支座的转换可这样设置：在永久活动支座两侧临时支承的千斤顶下面不放滚轴，当千斤顶起顶时，永久活动支座脱空，其两侧的临时支承就起到临时固定支座的作用。这种支座的转换较为方便。

临时支承的互相转换，大量的顶落梁工作，这些都是关系到全桥安全的重要操作工序，必须引起设计人员和施工人员的重视，切不可疏忽大意。必须按操作规程进行，特别应注意千斤顶的安全操作规程。

(3)临时活动支座的布置，如图 4-4-15 所示，主要包括以下各部分：

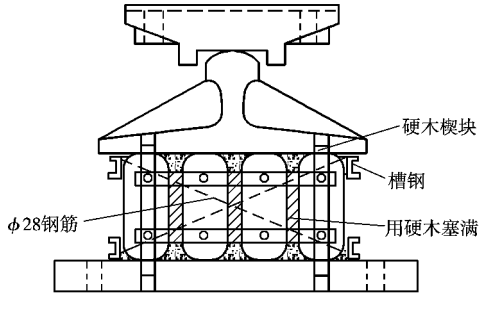


图 4-4-14　临时固定支座结构图

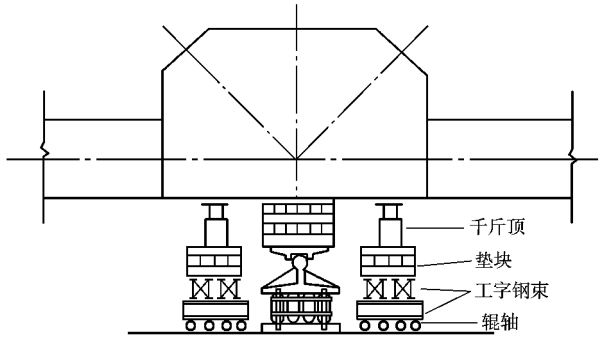


图 4-4-15　临时活动支座

①左右两边的支座顶落梁用可调辊轴，以适应因顶落梁引起的伸缩变化。

②中间的支座作为保险用，随顶落梁调整高度。

③顶落梁停止后，放松千斤顶，反力由中间的支座承受。

④如中间的支座由垫块、工字钢束组成时，应考虑支点偏心受力的影响，或在结构上采取

措施使之接近中心受力。

五、钢梁纵移

(1)影响钢梁纵向偏差的主要因素。钢梁在悬臂拼装过程中,由于一些因素的影响,常引起纵向长度几何尺寸的偏差。造成这种纵向偏差的主要因素有:

①架梁过程中梁的自重引起的变形。

②架梁阶段中气温的升降变化引起梁的伸缩。

③钢梁制造时的长度误差。

④墩台建造时墩位中心的定位误差。

⑤架梁过程中由于经常地顶落梁而引起的梁体几何长度的变动。

⑥临时支座的摩阻力对钢梁变形的影响。

这些因素造成了钢梁的纵向偏位,致使钢梁各支点不能按设计位置落在各桥墩上,使桥墩偏载。为了调整这一误差至允许范围内,钢梁需要纵移。

(2)钢梁纵移的方法。钢梁的纵移工作必须在一孔简支梁或一联连续梁架完后进行。纵移时各桥墩需同时设置纵移设备。通常是放在钢梁节点下面。此法需要大量的墩顶布置工作,既费工又费时,常常影响架梁的总进度。为了使纵移工作顺利进行,可使用以下方法:

①温差法。即利用一天的气温差,结合钢梁热胀冷缩时物理性能,随着一天温度的变化倒换支座的性质,使活动支座与固定支座相互转换,可以达到纵移的目的。

如图 4-4-16,由于纵向偏差,需要由 4 号墩向 1 号墩方向纵移。在最低温度时将 4 号墩支座固定,把 1 号墩变为活动支座。随着温度增高,钢梁朝 1 号墩方向膨胀。当达最高温度时,将 1 号墩变固定支座,4 号墩变活动支座,使钢梁随温度的下降又朝 1 号墩收缩,使钢梁由 4 号墩向 1 号墩移动了一个长度 Δ。根据需要的总移动量,如此重复几次,即可达到纵移的目的。每次移动长度 Δ 按下式计算:

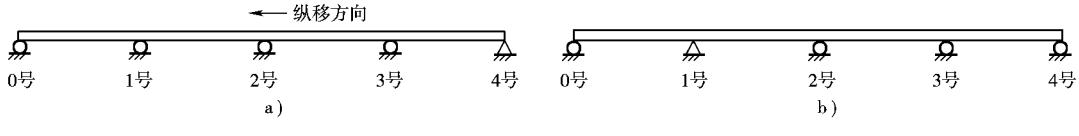


图 4-4-16　温度升高与下降时支座布置图

a)温度升高时支座布置;b)温度下降时支座布置;

$$\Delta=\alpha t l \tag{4-4-3}$$

式中:α——钢的线膨胀系数,为 0.0000118;

t——温度差;

l——钢梁温度跨度,由固定点算至计算点。

例如某桥为三跨 160m 的连续梁,施工中有一天日温差达 16.5℃,按温度跨度为 480m,则理论移动量为:

$$\Delta=\alpha t l=0.0000118\times16.5\times480=0.093\text{m}=93\text{mm}$$

实际上的移动量要小于理论移动量,这是因为:温差的转折点掌握不准,不能及时地变换支座性质,使钢梁朝反向也移动了一个长度;因使用的温差是气温差,而钢梁伸缩实际是由钢梁本身的温差决定,二者有差别;有时固定支座失去作用,钢梁也可以向反向移动。这些不利

影响只要认真对待，是可以克服的。这种移梁方法简单方便，但受天气影响大，如果天气不好的话，移梁效果较差。

②顶落梁法。在连续梁中，利用该联钢梁中间某一个支点的顶落及两旁支点的支座变“固”或变“活”的相互转换，使钢梁像蛇一样的爬行，向着预定的方向蠕动。具体操作示意如图4-4-17所示。

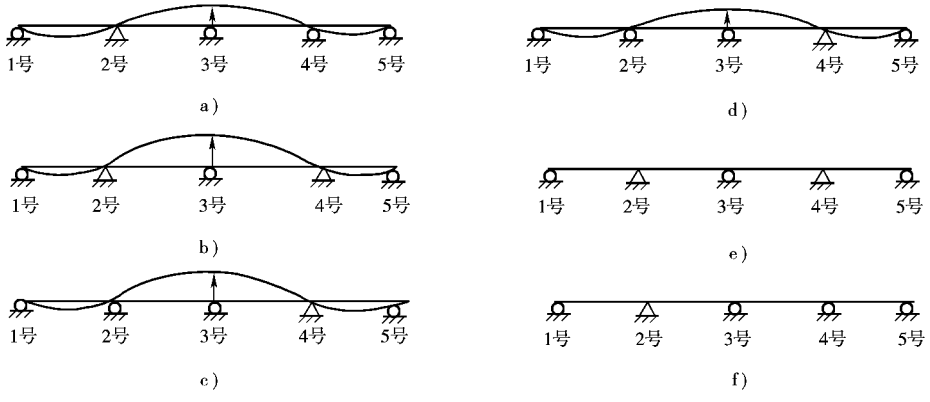


图4-4-17　顶落梁示意图

a)3号墩顶高(此时2号墩固定，4号墩活动)；b)4号墩变固定；c)2号墩变活动；d)3号墩下落；e)2号墩再变固定；f)4号墩再变活动，重新顶高3号墩开始下一循环

经过这样一个循环，钢梁即可向2号墩方向蠕动一个长度，根据需要移动的总长度，可确定进行几个循环，即可达到移梁的目的。

由于每次顶落量以不倒动千斤顶为原则，千斤顶一般进程为0.1～0.15m之间，因此每一循环大致可使钢梁移动6～10mm。如果我们预先把钢梁开始拼装的温度与架设到本联固定支座时各阶段的气温估计出来，并计算出由于这种气温的变化引起的钢梁伸缩。这样，根据这个伸缩量，在一开始拼装钢梁时就预先调整钢梁的支座位置，这样在拼到各个桥墩时，不需要纵移钢梁即能准确地落到支座上。这种方法已在一些大桥施工时使用过，取得了较好的效果。

钢梁纵移完成后，即要降落在永久支座上。这时要注意活动支座的位置，即辊轴的倾斜方向及倾角要符合设计的要求，如果在全部恒载作用下，并选择适当的气温时刻进行支座安装，这时，辊轴的位置接近竖直，对施工是有利的。

有时在钢梁拼装后，纵横向偏差不是很大时，纵横移可同时进行。此时，只需将钢梁下的滚轴斜向一定角度，使纵移时，也可起到一定的横移作用，借以达到纵横移同时进行的要求。

六、钢梁的横移

钢梁在伸臂安装过程中，由于受日光偏照和偏载的影响，加之杆件本身的制造误差，钢梁中线位置会随时改变，有时偏向上游侧，有时偏向下游侧，以至到达墩顶后，钢梁不能准确的落在设计位置上，造成对桥墩偏载。为此必须进行钢梁横移，使偏心达到允许范围之内。根据规定，墩台处铁路横梁中线对设计线路中线偏移≯±10mm。横移后的钢梁必须在这个限度以内。公路钢桥可参照此规定执行。

一般地说，钢梁刚拼到墩顶时，反力只有架到墩顶上半个节间的钢梁质量，支点反力较小，此时横移条件最好。

横移可用专用的横移设备，如图4-4-18所示，也可以根据情况临时采取措施。横移设备

一般放在横梁下，有时也放在下弦杆节点下。它是由竖向千斤顶、横向千斤顶和横移滚轴组成。滚轴为圆钢，横移时横向千斤顶打油后，推动长垫块，滚轴开始滚动，钢梁随之移动。在这里应特别注意，应使竖向千斤顶与钢梁的滑动摩擦力大于竖向千斤顶下滚轴的滚动摩擦力，这样钢梁才能横向移动。为此可在钢梁与千斤顶间垫粗砂纸、薄木板和石棉垫。

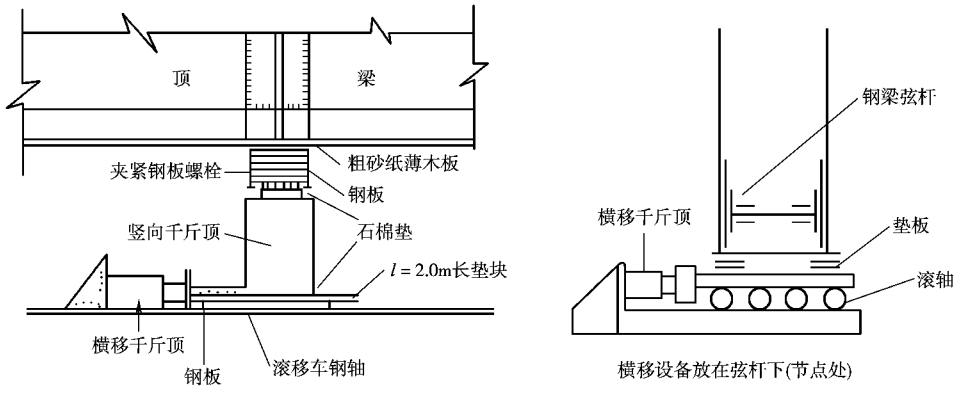


图 4-4-18　钢梁横移布置图

横移必须在拼装过程中逐孔进行。有一种简易的方法就是在钢梁拼至桥墩尚未就位时，由于桁架在长伸臂状态下横向刚度较弱，这时在支座上放滚筒或冲钉，使钢梁在其中可横向移动。利用桥墩牵拉倒链滑车，把钢梁拉回到正确位置，然后及时地顶起钢梁，利用其竖向反力产生的水平摩阻力来阻止钢梁的回弹。

七、降低钢梁安装应力和伸臂端挠度的措施

钢梁在悬臂安装施工时，应尽可能减轻悬臂孔的施工荷载，充分保证钢梁拼装时的稳定性，采取措施降低钢梁的安装应力和悬臂端的挠度，以保障悬臂施工的可靠性与安全性。总结我国钢梁悬臂安装施工的成功经验，常采用下列措施加强施工监控，即加设上加劲梁法、临时加固措施法、墩旁托架法、半悬臂拼装法、中间合龙法、吊索塔架法、水上浮船吊机法等。下面分别予以分析讨论。

1. 加设上加劲梁法

该方法是在悬臂安装钢梁的应力最大区段加设临时的上加劲梁，使临时加劲梁和钢梁组合成一整体结构，使之共同受力，以降低悬臂根部区段杆件的安装应力，增强该区段的刚度和强度，也减小悬臂端的挠度。加劲梁如图 4-4-19 所示。

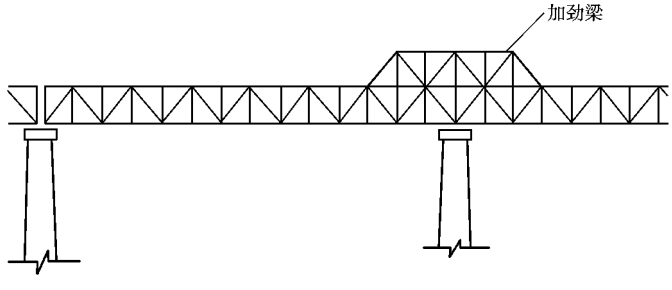


图 4-4-19　加设上加劲梁示意图

加劲梁可借用暂不拼装的钢梁杆件，当该孔钢梁拼装完毕后即可把加劲梁拆除移至另孔

使用。这种方法虽然有效，但拼装和拆除加劲梁仍感费工费时，故此法不常采用。

2. 临时加固措施法

在悬臂安装钢梁根部应力最大区域，对于承受压应力或拉应力的杆件，可在设计时就采用较大截面的杆件或箱形杆件等，以满足钢梁悬臂架设的需要。或者对于压杆，可在杆件中间增加临时支承以减小杆件的自由长度，也可在杆件内嵌入方木并用螺栓和钢箍与杆件夹紧形成整体，以增加压杆的刚度和稳定性，以防压杆被压屈失稳垮塌。若是多跨悬臂安装的钢梁，需加固的杆件较多，加固用的材料不易回收。是否非采用此法，应结合桥位所在工地具体情况而综合考虑决定。

3. 墩旁托架法

为避免钢梁超过安装应力或过多的加固杆件，悬臂拼装钢梁时，可在前方墩台的一侧，安装一定长度的临时刚架即墩旁托架。当钢梁悬臂拼装至托架顶部时，则可将梁端支承在托架上，以减小悬臂长度，改善悬臂时的受力状态和减小梁端挠度。

图 4-4-20 为南京长江大桥施工用墩旁托架图。

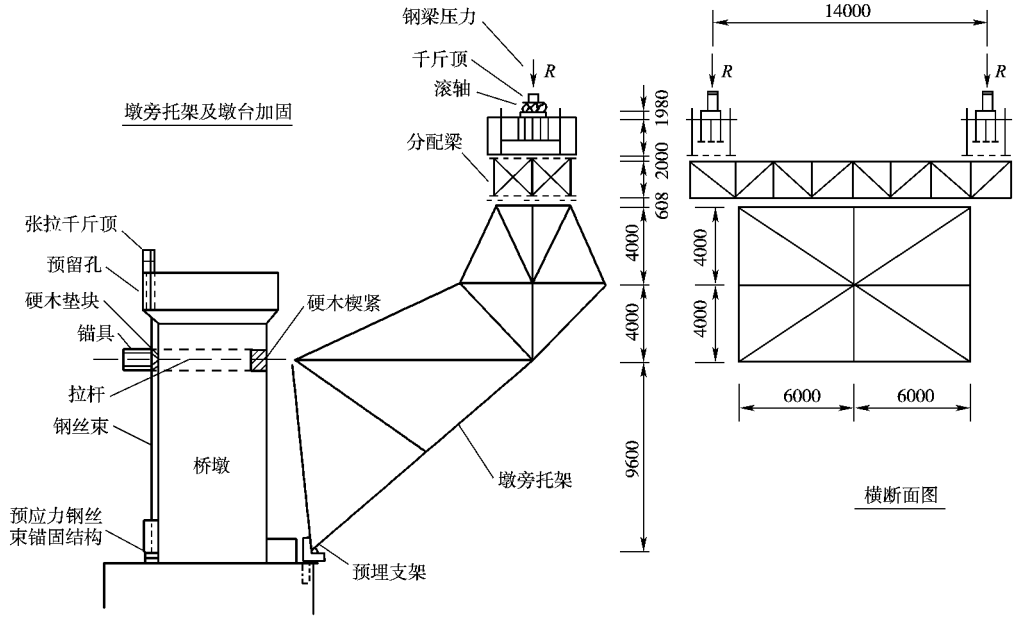


图 4-4-20　南京长江大桥墩旁托架施工图(尺寸单位：mm)

托架通常是用万能杆件拼成，其长度根据施工要求来决定。托架的水平拉杆(或水平上桁架)的一端，锚在桥墩上，当托架受力时，使墩身产生较大的弯矩，该弯矩使桥墩的另一侧产生较大的拉应力。一般来说，最大拉应力值应控制在桥墩不出现裂缝的允许范围内，否则，要对桥墩作特殊处理。通常是在托架另一侧的墩身上施加预应力，预应力的大小由下列两个条件决定：

(1)桥墩在预应力单独作用下产生的最大拉应力最好与预应力和托架受力时产生的最大拉应力值相接近，并且不得超过容许值。

(2)桥墩内力的偏心 e 应小于容许值，对于混凝土及石砌墩台，e 值应不大于 $0.35b$，b 为墩宽。

墩台预施应力的设备安装费时费工，给施工带来一定的困难，故此法应尽可能避免使用。

托架安装的关键在水下部分。托架下支座一般在水下安装，宜采用敞口式带导向的支座，并在灌注承台时预埋。托架的桁梁部分用水上吊机整体拼装就位。

4. 半悬臂拼装法

为了减少钢梁的悬臂长度，在条件允许时，可在桥孔中设置一个或几个临时墩，使钢梁受力状态大大改善。在多孔钢梁悬臂拼装时，第一孔钢梁多用此法拼装。临时墩的个数根据拼装中钢梁的稳定性和受力状态来决定。临时墩多由拆装式杆件拼成，有时也利用试验墩。采用活动升降平台是一种使用方便的临时支承。当临时墩较低时也可用枕木垛、钢轨束、工字钢束等垒成。临时墩的基础要可靠，以防止墩架沉陷引起钢梁附加应力。

5. 中间合龙法

大跨度连续梁或简支梁已广泛采用全悬臂安装或半悬臂安装。但是，随着伸臂长度的增大，为保证钢梁稳定所需的锚固梁的长度也将增大；支座附件处杆的安装应力和梁端挠度也将增大，有时还会超过允许值；过大的伸臂长度，将使钢梁的横向刚度减小，甚至会使钢梁在安装过程中产生较大的晃动。为了改善这些不利的情况，可采用中间合龙法，即由桥跨两旁的墩（台）向跨中同时拼装钢梁，在跨中进行合龙。例如，我国在拼装跨长 192m 的金沙江大桥时，即采用了中间合龙法。

中间合龙法的关键问题是：在架设过程中如何保证由墩（台）相向拼来的钢梁至桥孔中间时，两侧钢梁的端截面保持垂直（即 $\phi_1=\phi_2=0$），两侧钢梁合龙的杆件对准，无相对偏差（例如 $f_1-f_2=0$），只有这样钢梁才有可能通过纵向移动的调整顺利地达到合龙。

目前，现场采用调整锚固梁前后支座的相对高度来达到上述目的，如图 4-4-21 所示，并使合龙截面处的弯矩和剪力均为零，使合龙节点在无应力的情况下拼装，合龙后再进行应力调整。使两侧钢梁在纵向移动微调位置以达到合龙的方法，目前主要有两种，即节点式和拉杆式。

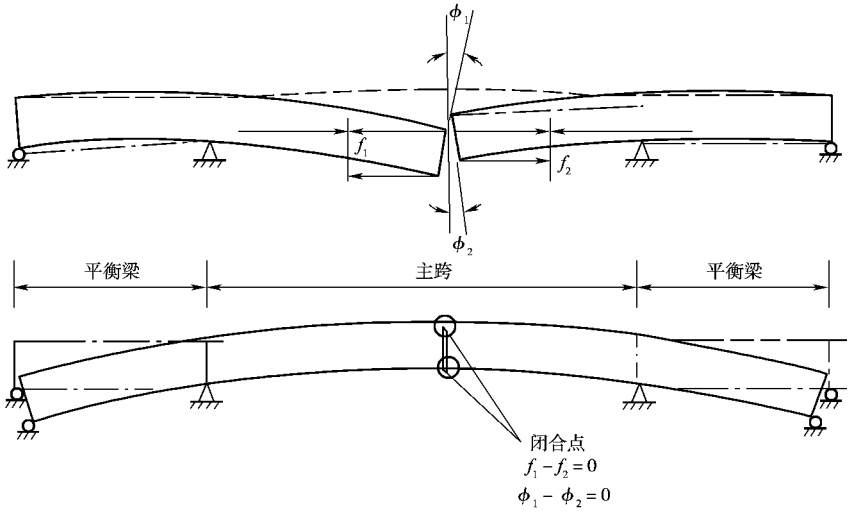


图 4-4-21　中间合龙示意图

（1）节点式。即在合龙节点处上、下弦杆设置合龙铰，如图 4-4-22 所示。

这种方法就是从两侧墩（台）相向拼至跨中后，杆件已全部拼完，只剩中间节点尚未合龙，此时调整锚孔梁前后支座的高度，使两侧钢梁合龙处的弦杆中线高程一致，并使两侧弦杆端截面之间预留 60～80mm 的空隙量，以便最后纵向微调时对齐。在每桁上、下弦需合龙的节点处设合龙

铰，在附近弦杆上设张拉设备，张拉设备对称装在弦杆竖板的外侧，合龙铰则装在弦杆水平腹板上。拉力设备由托架、顶梁及拉杆组成，每个拉力设备配备 50t 千斤顶一台。当下弦（或上弦）平面内四个千斤顶同时起动后，梁体即徐徐移动，当移到适当位置时即插入合龙铰轴。

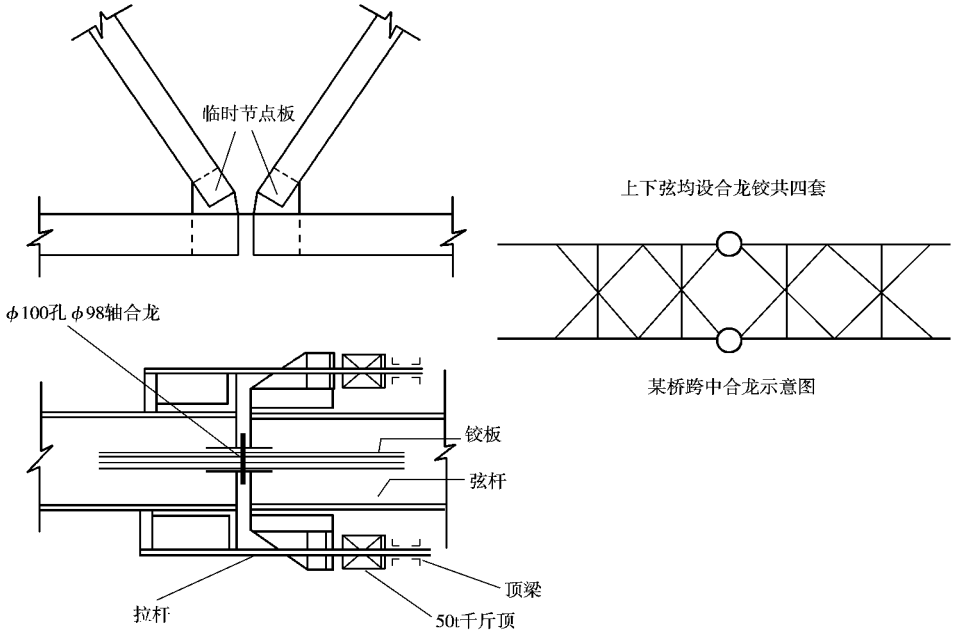


图 4-4-22　节点式示意图

合龙铰由铰板和铰轴组成，铰板有 ϕ100 的孔眼，以插入铰轴。铰轴直径为 ϕ98、ϕ96 各一个。在闭合困难时，可先插入 ϕ96 轴，然后再换成 ϕ98 轴。安好铰轴后，在节点板钉眼处进行扩孔，然后进行栓接。

（2）拉杆式，如图 4-4-23 所示。这种方法就是：钢梁相向拼装剩最后一个节间时，该节间杆件先不拼装，而先装上临时腹杆②及③，②为斜拉杆，③为水平拉杆。用两侧锚固梁前后支

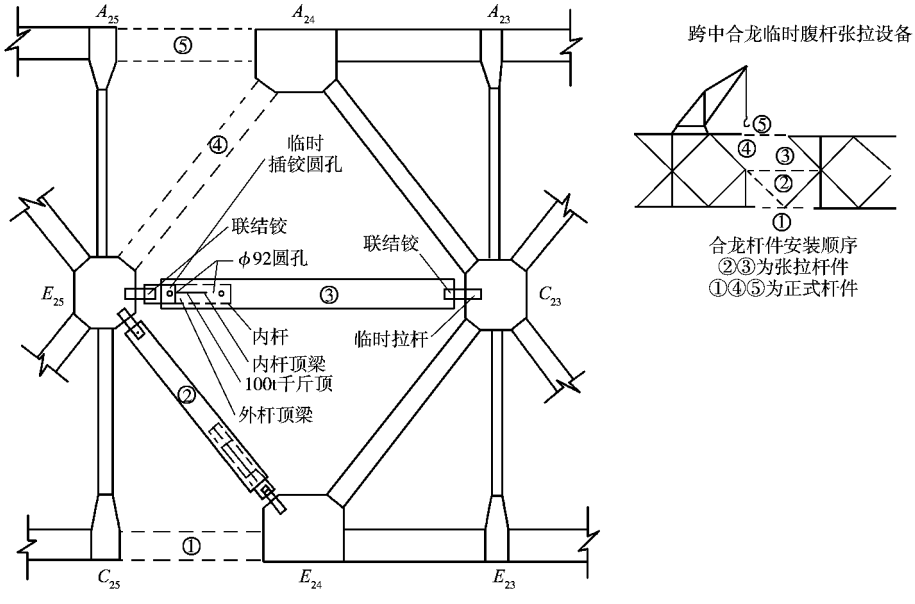


图 4-4-23　拉杆式示意图

承调整位置，使上、下弦杆位置对齐，在纵向预留 40～50mm 空隙量，以便最后进行调整。拉杆系由两箱形截面的杆件套插而成，内、外杆均有顶梁，中间安设千斤顶，以备推顶用。内、外杆均有长圆孔，可供内、外杆相对伸缩用。每个拉杆各配有 ϕ91 铰轴五个，通过铰轴及临时拉板可与主桁节点相连。

水平位置调好后，起动千斤顶，内、外拉杆分别把桁架向内拉紧达到要求后，插上铰轴，停止起顶。安设下弦杆①、斜杆④、上弦杆⑤，然后拆除临时拉杆，安设腹杆②，钢梁即合龙。为了保证预拱度需拟订必要的施工规程。

三跨连续钢梁在中跨合龙后，在自重与施工荷载作用下的受力状态与两个简支悬臂梁相似，跨中合龙处的节点弯矩与剪力均为零，而中间支承处弯矩颇大，与设计要求不符，需进行应力调整。此时可按照设计要求将连续梁的两端用千斤顶顶起，如图 4-4-24 所示。待端支点的反力与设计数值相等时，即可认为符合设计要求。

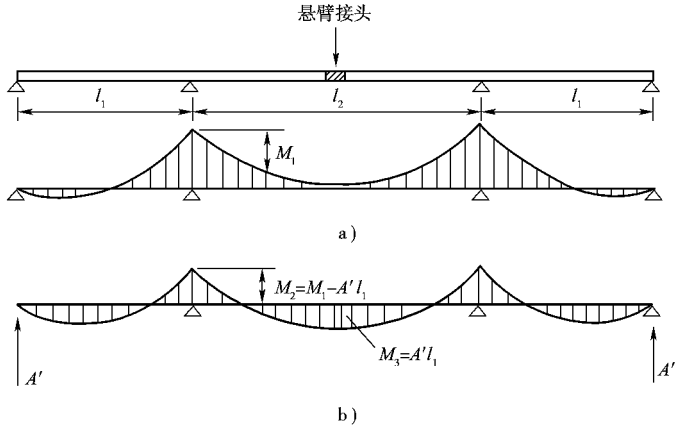


图 4-4-24　中跨合龙应力调整示意图

a)合龙后力矩图；b)调整后的力矩

6. 吊索塔架法

用吊索塔架法进行钢梁的全悬臂拼装施工，可通过吊索的斜拉力减小钢梁的安装应力并控制其挠度，有利于悬拼的施工线形及受力控制。因此，吊索塔架是大跨度钢梁悬臂安装施工的重要辅助结构，自 20 世纪 70 年代以来，我国在悬臂安装大跨度钢梁中多次成功地使用了吊索塔架法。在悬臂拼装钢梁时，随着悬臂长度的加大，悬臂孔支座附近的杆件应力和悬臂端挠度越来越大。吊索塔架的作用，就是当钢梁拼装到一定长度时，在下锚箱张拉吊索，或起顶塔架，将钢梁悬出部分向上提拉，借助吊索的斜拉力，从而减小杆件应力和梁端挠度，使之安全的拼装到下一桥墩上。如图 4-4-25 所示的吊索塔架，它对杆件减载的依据是：按照设计要求，钢梁拼到一定长度张拉吊索时，吊索的斜拉力可以分解为水平分力和竖直分力。水平分力对吊索范围内的上弦杆产生压力，可抵消一部分上弦杆因悬臂安装产生的拉力。而竖直向上的分力与钢梁自重相反，它产生一个反力矩，对钢梁上、下弦杆均有减载作用。特别是对靠近支座的杆件，吊索的竖直分力的减载作用尤为显著。另外，吊索除对杆件起减载作用外，也大大地减小了悬臂梁端的挠度。

吊索塔架是由支于钢梁上的塔架、高强度斜吊索、上下锚箱、上下拉板，以及锚箱小车等组成，如图 4-4-25 所示。其各部分详细构造简介如下：

(1)塔架：通常是用拆装式杆件拼成。其高度系根据钢梁最大悬臂长度及其他因素来决

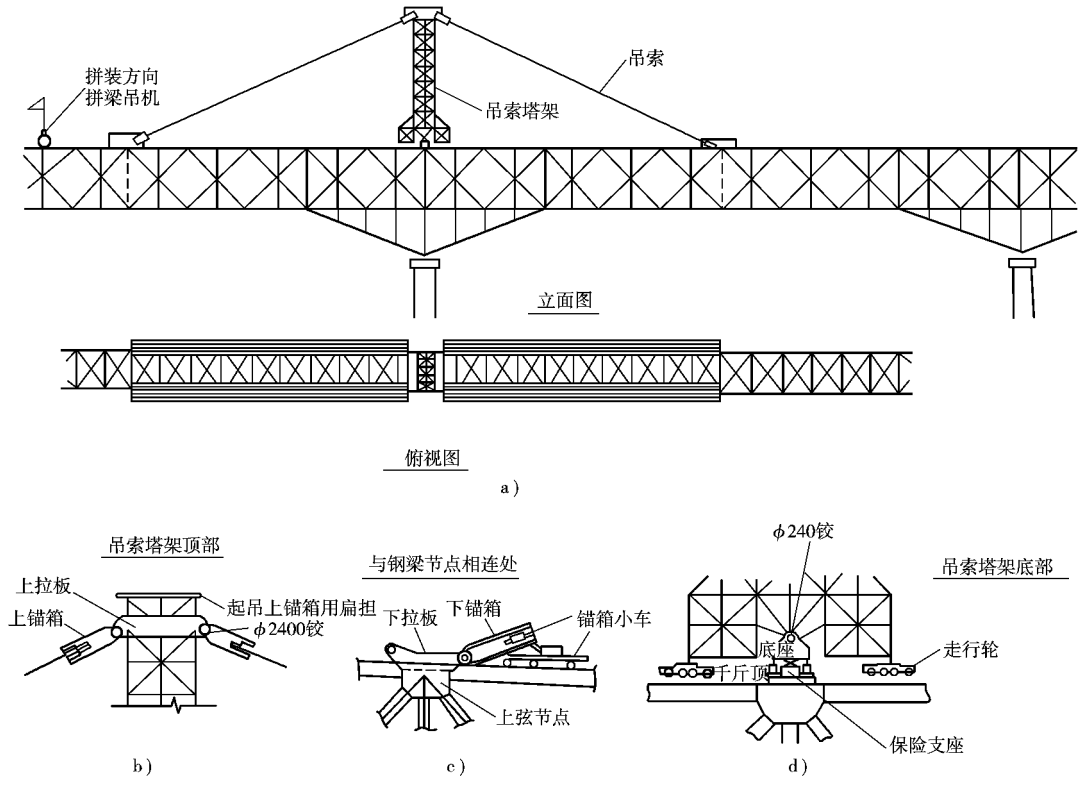


图 4-4-25　吊索塔架悬拼施工图

定。例如，某桥悬臂 160m，塔架高曾用 33.83m。塔架宽度通常是和桁架同宽，以利塔架在上弦杆上走行。其底部中心设有底座，如图 4-4-25d）所示，底座与塔架、塔架上顶端与吊索均用铰接相连，以使塔架受力明确，使塔架只受轴向压力，处于良好的受力状态，底座下设保险支座和千斤顶，以便在必要时起顶塔架，提拉钢梁。

塔架在钢梁上弦走行的轨道，可用拼梁吊机走行的轨道。为了使塔架在工作状态下受力明确，底座千斤顶起顶时应使塔架走行轮脱空。塔架的荷载通过铰轴由底座传至上弦节点，再通过钢梁传至墩台。施工时通常是在地面上预先把塔架分段拼好，用提升站的吊机把每段塔架吊到上弦平面，再用钢梁上弦平面的吊机逐段拼装，这样安全可靠，省工省时。

（2）斜吊索：斜吊索是用 ϕ5mm 高强钢丝组成的钢丝束或钢绞线。根据受力情况，由计算决定使用的束数。如某公铁两用钢桥悬臂 160m，用 70 根 ϕ5mm 钢丝制成的钢丝束，全桥共 24 束（即每侧 12 束，每个弦杆吊点上 6 束）。钢丝束两端均用环销式锚头，以便张拉。

钢丝束的各束长度应完全一致，以便张拉时各束受力均匀。

（3）上、下锚箱（图 4-4-25b）、c），上、下锚箱是锚头与拉板之间的连接构件，其上用铰与拉板相连，以便受力明确。

下锚箱设张拉设备，以便在拼梁时张拉吊索时消除吊索初垂度并提拉钢梁。下锚箱放在锚箱小车上，使移动吊索塔架时锚箱移动方便。锚箱小车和塔架同宽，移动时靠滑车组和卷扬机带动。

（4）上、下拉板：是预先联牢于塔架顶部和钢梁上弦节点的钢板，并用钢铰与上下锚箱相连。吊索作用力将通过上、下拉板传至塔架和上弦节点。吊索塔架是高空受力结构，每拼完一

孔还要移动一次，因此必须随时注意塔架的稳定和安全。对于钢丝束的制造、塔架的拼装、吊索的初张拉、塔架的起顶、塔架和锚箱小车的走行等均要制定施工规程，施工时应严格遵守施工规程。

7. 使用水上浮船吊机法

当悬臂拼装至一定长度，若钢梁某些杆件的安装应力接近容许值，拼梁吊机以很大的集中荷载作用在悬臂端不能再向前拼装杆件，这时如条件许可，可将拼梁吊机后移至支座处，所余1～2个节间杆件的安装工作，可用水上浮船吊机进行。水上吊机应在水位平稳、无大风大浪的情况下使用，使吊机在稳定状态下拼装杆件。吊装杆件一经就位，上足冲钉和螺栓后，应立即脱钩，以防浮船摇摆时吊钩牵动钢梁，使钢梁承受额外的附加力。另外，为了减小钢梁悬臂端的荷载，可由水上运送钢梁杆件。

八、悬臂架设钢梁的计算

钢梁悬臂架设的计算包括架设临时结构和设施的计算，以及钢梁结构本身在不同受力状态下的检算。临时结构和设施的计算包括膺架、临时支承、墩旁托架、吊索塔架中间合龙辅助设施等的计算；钢梁结构本身的检算包括不同伸臂状态下的杆件应力和伸臂挠度的计算，钢梁在悬臂架设中的总体稳定性检算等。

由于施工过程的影响以上各检算项目的因素非常复杂，需要进行深入细致的具体分析和研究，所以，这里仅给出一般的计算原则和计算方法供参考。同时需要指出的是，在施工计算中为了简化计算，常需将较复杂的受力状况简化，但简化时必须抓住主要受力和影响受力的因素，使得简化后的受力图式比较合理。对于简化可能造成的计算偏差，应在计算时选用一定的安全系数以保证施工中临时设施和钢桥结构本身的安全。

1. 施工荷载计算

(1)钢梁自重

钢梁自重可由设计资料查得。

(2)施工临时荷载

①下弦运料道和人行道重。

②上弦拼梁吊机走道重。

③上弦人行道重。

④风、水管路与安全网重。

⑤人群荷重。

⑥拼装吊机重，杆件运输平车重，拼装脚手重等。

⑦吊索塔架重(如设有)。

⑧平衡压重(如设有)。

(3)风荷载

风荷载根据桥位处的风压值根据规范计算确定，必要时要对区域的风力进行实测验证。

2. 临时支承布置及受力计算原则

为了减小梁的悬臂施工长度，一般采用在悬臂前端设置临时支承的方法，其设置的原则是保证梁在悬臂施工时的倾覆稳定系数不小于1.3，并和其他措施综合考虑以保证钢梁杆件在悬臂施工过程中杆件内力不超过容许值。

临时支承的计算荷载应考虑使其产生最大反力的情况，并应考虑相邻支墩不均匀沉降可

能导致的支墩超过正常计算受力值的情况，适当地增大其安全系数。

3. 最大伸臂时杆件安装应力的计算

最大伸臂时杆件安装应力的计算是施工计算中非常重要的一环，因为钢梁悬臂施工时结构的受力状况与运营状态下的受力状况有较大的差异，有时杆件的拉压完全相反，所以钢桁梁的有些杆件的受力是由悬臂施工期间的受力控制，而不是运营状态下的受力控制。

为了方便计算，常把作用于钢梁上的均布荷载简化为节点荷载，并用结构计算程序利用计算机进行杆力分析计算。

当桁架为三角形腹杆体系的平弦桁架时，其基本计算公式如下。

由于各节间剪力由各节间斜杆承受，所以有：

$$S_{斜}=Q\times\frac{斜杆长}{竖杆长}=Q\cdot\frac{1}{\sin\alpha} \tag{4-4-4}$$

式中：$S_{斜}$——斜杆内力；

Q——节间剪力。

由于各节间的弯矩由该节间的上下弦杆承受，所以有：

$$S_{弦}=M\cdot\frac{1}{桁高}$$

式中：$S_{弦}$——弦杆内力；

M——该节间弯矩。

4. 最大伸臂时桁架挠度的计算

大跨度钢桁梁的悬臂架设有时伸臂长度较大，梁端的下挠垂度也较大，这不但使钢梁难以拼上前方桥墩，而且使下弦的运料小车轨道的坡度加大，小车上下运料不好控制，还加剧了钢梁的晃动。为此，必须计算钢梁的最大施工挠度及全梁的挠度曲线值，并以此作为依据决定各个支座的布置和顶落梁的高度，来克服下挠过大带来的问题，必要时采取其他措施，适当减小梁的下挠度。

计算梁的下挠度一般采用虚功原理公式。在桁架中，各杆仅受轴向力，且杆件为等截面杆，内力分布均匀，所以桁架的变位公式为：

$$\delta=\sum\frac{\overline{N}_k N_p S}{EF} \tag{4-4-5}$$

式中：$\overline{N}_k$——各杆件由单位力引起的杆力；

N_p——荷载作用下各杆的内力；

E——杆件的弹性模量；

S——各杆件长度；

F——各杆件截面积。

第四节　拖拉法架设钢梁

一、概　　述

钢梁拖拉架设法是将钢梁在桥头路基或临时膺架上进行拼组（铆合或栓接），并在钢梁（纵梁下或主桁节点下）安设“上滑道”，而在路基或膺架、墩台顶面安置“下滑道”，在上、下滑道之间根据施工设计的需要放置一定数量的滚轴；然后通过滑车组、绞车等牵引设备，沿桥轴纵向

拖拉钢梁至预定的桥孔；最后拆除附属设备，落梁就位。

以前，拖拉法对于架设板梁以及多孔的中小跨度桁梁使用较多，1972 年采用拖拉法成功地架设了单孔 144m 简支钢桁架桥，从而为使用拖拉法架设大跨度钢梁开辟了新的途径。

拖拉法架梁的优点是：钢梁的现场栓接工作大部分是在岸边路基或工作平台上进行，工作条件好，容易保证质量；同时减少了高空作业的时间，比较安全；其次，钢梁的拼装工作可以和墩台基础的施工并列进行，因而可以全面使用劳动力以缩短工期。拖拉法用于多孔连续梁的施工时，在一定的条件下，较为经济。拖拉法用于战时抢修或行车线路上的换梁则可以保证较快速度的通车。

拖拉法架梁的缺点是：为使用拖拉法就需要有一定的拖拉牵引设备；需要设置一定数量的滑道以及布置临时墩架等；更重要的是，拖拉法受到建桥工点附近地形的限制。

对于大跨度双线钢梁，如果使用拖拉法则桥面系超强过多，加固量大，就显得不经济而且耗费时间。

二、常用的几种拖拉架梁的方法

1. 半悬臂的纵向拖拉

根据被拖拉桥跨结构杆件的受力情况，以及结构本身稳定性的要求（纵向抗倾覆稳定系数必须大于 1.3），在拖拉过程中有时需要在永久性的墩、台之间设置临时性的中间墩架，以承托被拖拉的桥跨结构，这就是半悬臂的纵向拖拉。如图 4-4-26 所示。

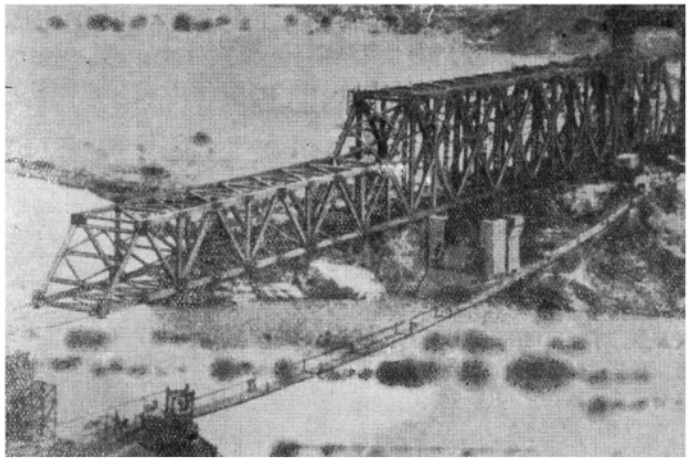


图 4-4-26　黄河禹门口 144m 简支钢桁梁全伸臂拖拉架设

在水流较深、水位稳定、又有浮运设备而搭设中间膺架不便时，可考虑采用中间浮运支承的纵向拖拉。如图 4-4-27 所示。必须指出的是，船上支点高程不易控制，要十分注意。

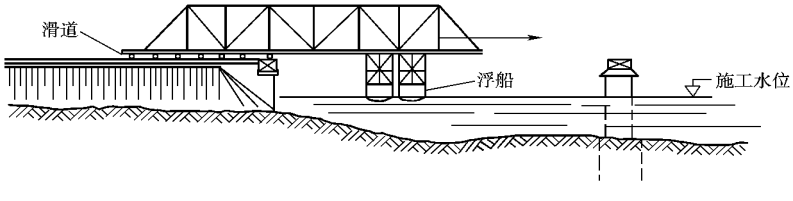


图 4-4-27　浮运拖拉架设钢桁梁

2. 全悬臂的纵向拖拉

当水流湍急不能采用浮运或浮拖、河床覆盖层较浅、有时冲淤不稳定、不宜于用桩基或在岩盘上建筑临时墩架时，就要考虑使用在两个永久性墩、台之间不设置任何临时中间支承的全悬臂纵向拖拉。

图 4-4-28 为用拆装式杆件组成导梁的全悬臂拖拉。导梁的长度须使整个连接起来的系统在纵向拖拉时能保证抗倾覆稳定。

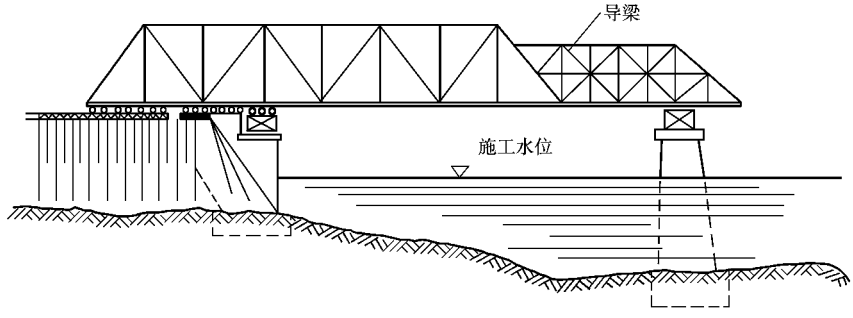


图 4-4-28　全悬臂纵向拖拉施工

图 4-4-29 表示多孔钢梁用临时杆件连接的纵向拖拉。

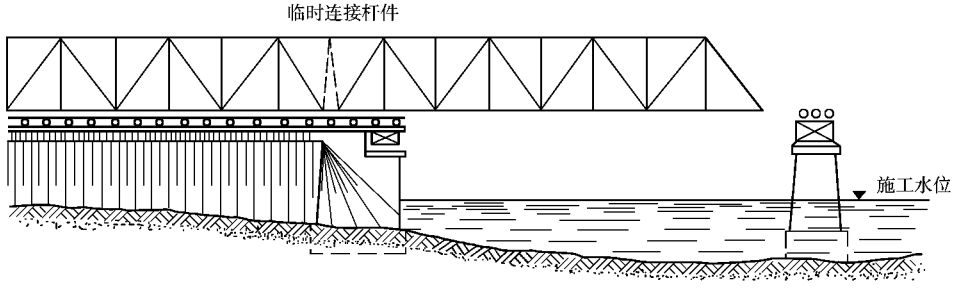


图 4-4-29　多孔钢桁梁纵向拖拉架设

在拖拉过程中有时尚需在平衡梁上采取压重的措施，以保证钢梁的纵向稳定性。

三、滑道、滚轴

上滑道一般设置在铁路纵梁或主桁下弦杆节点板底部，可采用连续满布式的，也可采用间断式的（即分段设置的上滑道），这要根据下滑道的布置及计算来确定。

图 4-4-30 是在纵梁下设置的上滑道构造。

当采用设置在纵梁下的滑道时，必须注意纵梁中心距较小，钢梁应有足够的横向稳定性，并不要使纵梁超应力或局部失稳。

因为纵梁中心距较主桁中心距小很多，所以在纵梁下设置滑道的优点是路基可以不加宽，而且便于在靠岸的较小跨度的上承梁桥面上拖。因为纵梁的刚度较下弦杆本身的刚度大一些，故在墩、台处的下滑道不需要加长。

其缺点是纵横梁的截面毕竟过小而刚度较弱，在拖拉过程中由于支点反力的变化而需要对个别纵横梁进行加固。

纵梁下滑道一般适用于中小跨度（小于 64m）的下承式钢梁。

图 4-4-31 为 $l=144\text{m}$ 简支钢桁梁在下弦节点板底部设置的上滑道构造。

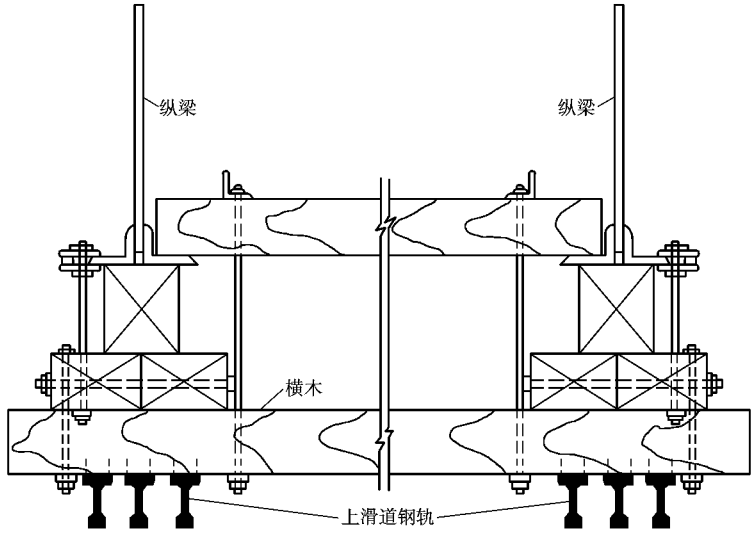


图 4-4-30　上滑道结构示意图

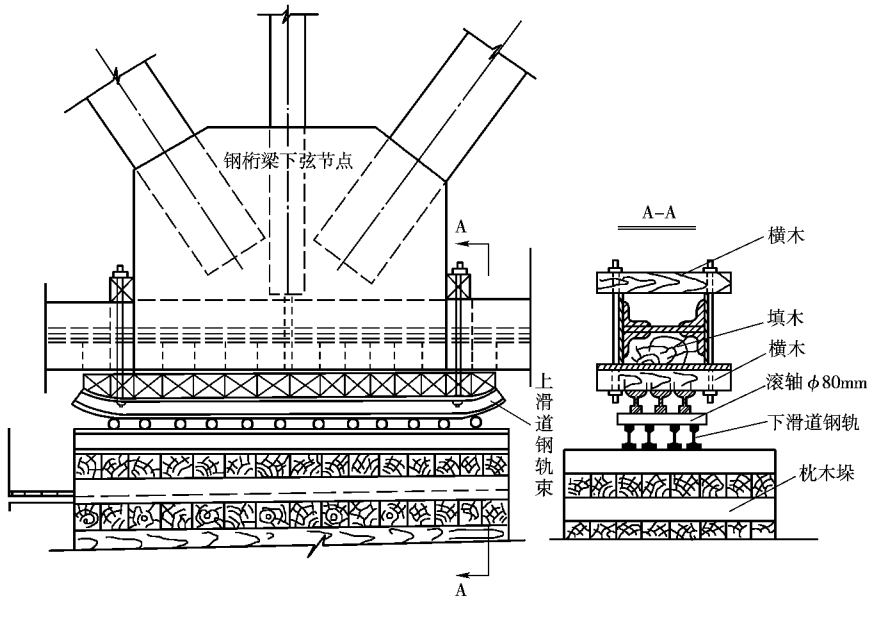


图 4-4-31　上滑道构造示意图

采用下弦节点上滑道时，要求在桥墩台的下滑道长度必须大于桁梁节间长度的 1.25 倍，以保证在拖拉过程中总有一个节点支承在中间墩架上。为此，需要在墩台沿桥轴的前后侧设置庞大的托架。而托架上的滑道支点反力对桥墩的偏心作用势必引起墩身截面的拉应力，墩身越高就越显得严重。

拖拉钢梁的下滑道是设置在桥头路基或中间墩架上的。

下滑道一般是将钢轨束设置在枕木上，但对于拖拉大跨度钢梁的下滑道却需要做一些个别的处理。图 4-4-32 表示的是 $l=144$m 简支钢桁梁拖拉时的下滑道构造。

该梁下滑道的特点是：每片桁梁的下滑道由两组 38kg/m 的 4 扣 3 钢轨束组成。其中距为 664mm。为保证下滑道不产生均匀下沉，灌注了 0.6～0.7m 厚、宽 2m 的 170 级混凝土作

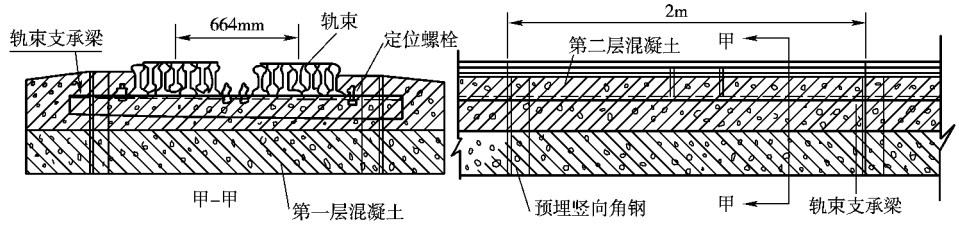


图 4-4-32　下滑道示意图

为下滑道的基础。为保证下滑道扣轨束水平，分两层灌注混凝土，灌注第一层混凝土时每隔2m埋设两根竖直角钢。经过抄平，在两根竖直角钢间焊一根水平角钢作为扣轨束的支承梁。扣轨束以定位螺栓和支承梁联牢。扣轨束接头采用错接。为防止轨束在受力时倾侧，在灌注第二层混凝土时，有意将每组轨束最外两根钢轨埋住一部分。实践证明，该种布置的下滑道在使用过程中质量很好。

下滑道可按水平的或有向下的坡度设置。为避免因滑道下沉而使钢梁移动产生阻力起见，使用下坡滑道较为相宜。下滑道的坡度范围一般在2‰～4‰，滑道应在全长范围内做成同一坡度。

有时在大跨度钢梁拖拉过程中，为了倒换支点（即倒换上滑道及滚轴），应在每侧下滑道设置两处过梁滑道。在过梁滑道下装有千斤顶，用以起落钢梁，便可倒换上滑道及辊轴，以更换钢梁的支承点。图4-4-33为过梁下滑道的基本构造。

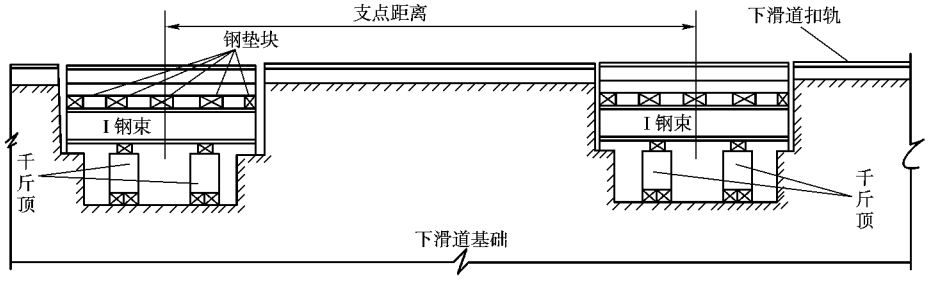


图 4-4-33　过梁下滑道基本构造

拖拉钢梁中，上、下滑道的设置必须注意质量要求。必须指出的是，上滑道的轨面向下位于一个平面上，以保持辊轴受力均匀。为此，在横木上设置垫木，其厚度随钢梁拱度而变化，如图4-4-34所示。

滑道钢轨的两端应做成弯头，以便辊轴的引进和脱出，同一滑道中几根并列的钢轨接头须整平，以免辊轴在接头处受到阻碍，钢轨端部弯头曲度应一致，且应安装整齐。路基上的下滑道下面一般宜至少垫以10cm厚的卵石夹砂层，整平压实。

墩台下滑道承受集中的支点反力，应选用每层厚度一致，上下刨平的素枕搭设。墩台顶面的排水坡应以楔木垫平，不必锚固。墩台下滑道应设置工作平台以利工人安全操作。

拖拉钢梁所用的辊轴，可采用A3或35号碳素结构钢旋制而成。辊轴直径和数目应根据承重，辊轴表面光洁度与滑道摩擦系数、操作方便等因素确定，辊轴的直径一般采用的是80～140mm。

辊轴长度应大于滑道宽度的200～300mm。

路基下滑道上的辊轴应沿全长均匀配置，间距常采用1～2m。墩台处下滑道上辊轴数量

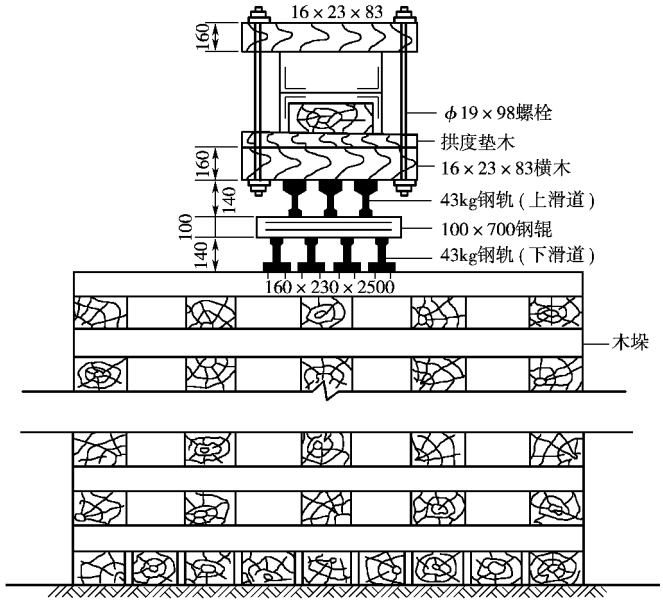


图 4-4-34　垫木设置示意(尺寸单位:mm)

按受力计算确定,均匀安排。辊轴间净距应不小于直径之半,以便互相卡住时利于拨正。

钢梁拖拉过程中方向需要纠正时,可在最前方墩台上将左右滑道上的辊轴适当地敲斜一些,待梁位纠正后即可再将辊轴放正。

辊轴受力的不均匀系数约为 1.1～1.4。

四、牵引设备

在平坡滚辊滑道上拖拉钢梁时所需的牵引力约为梁重的 3%～5%。考虑摩擦及其他因素影响实际采用的牵引设备能力一般可为梁重的 5%～8%。

拖拉钢梁时要选用相同型号的绞车、钢丝绳和滑车组。

对于绞车的类型、钢丝的直径、滑车组穿绕道数,以及锚固所用的千斤顶、地龙等设备均需根据施工设备现有情况并通过计算进行选用。

拖拉钢梁时应在梁的两侧对称地布置牵引设备,一般均应设置制动设备。通常在左右两侧各放一组牵引绳用两台绞车分别牵引。

牵引设备的布置当全桥不长时,是将牵引绞车安段在第一孔梁的后部,将定滑车置于对岸桥台之后,并适当架高些,而动滑车则系于钢梁的前端。图 4-4-35 为牵引绞车和制动绞车的布置。

如果全桥较长,拖拉距离较长,则可将定滑轮置于一个中间桥墩的顶部,用长千斤顶和对岸的地龙连接。当钢梁拖至该中间墩时,再将定滑轮前移,继续拖拉。

五、拖拉钢梁及钢梁中线控制的施工步骤

1. 钢梁中线控制施工步骤

(1)在桥头路基或中间脚手架上根据设计计算的要求布置滑道。

(2)在滑道上拼组栓接钢梁。

(3)安装牵引设备(绞车和牵引钢丝绳等)。

(4)拖拉前进行技术检查后,才能开始拖拉钢梁至预定的桥孔位置。

(5)钢梁降落就位。

2. 技术检查工作的主要内容

(1)钢梁的拼装质量(栓接的紧密度),钢梁拱度是否符合设计要求。

(2)连接杆件和加固杆件的数量、位置及安装质量。

(3)钢梁及墩台中线以及支承垫面的高程。

(4)上、下滑道及其基础的设置是否合要求。

(5)牵引、制动设备及其布置。

(6)落梁的工具及措施。

(7)信号及照明、施工及人身安全设备。

图 4-4-36 所示为 2 孔 64m 双线钢桁梁连接拖拉时,临时连接杆件和导梁的布置及杆件加固的情况。

临时连接杆件最好是用来拼装的钢梁杆件或常备式构件。设计上弦联接杆时应考虑钢梁在拖拉状态下的挠度,预先将连接杆缩短,以使钢梁易于移上桥墩。

加固杆件可以用增加横向支撑、缩短自由长度的办法来完成。

图中所示的导梁是用万能杆件拼成的,有时也可以用未拼装的纵梁来做导梁。使用导梁可以减少钢梁的悬伸长度,因而也就减少了杆件在安装中的应力。

中线控制:钢梁拖拉前,在下滑道枕木顶面画出桥梁中心线,拖拉过程中在钢梁两端中心挂线锤,以便随时测量,控制钢梁的中心方向。实践证明,拖拉中尽管牵引绞车用力均匀、速度一致,但钢梁总是要蛇形地前进,因此,必须随时注意钢梁中心的偏移,并及时地调整滚轴倾斜的方法来进行校正。

《铁路钢桁梁拼装及架设施工技术规则》中规定:在拖拉过程中,钢梁中线对设计中线的偏移限度为±5cm,且钢梁两端不得偏向于设计中线的一侧。

拖拉前,应向当地或中心气象台站了解拖拉施工期间二日以内的气象预报,一般在 6 级以上风力时不拖拉钢梁。

六、钢梁的落梁

当钢梁拖拉就位后,就必须将钢梁降落在永久性的桥跨支座上,称为落梁。

在落梁前,应先拆除架梁时所用的连接杆件。拆除连接杆件宜从两端向中间依次进行。当拆除上弦联接杆时,可将一孔梁的远端支点(该端的连接应已拆除)顶高或落低至适宜位置,使接头处不受力,以便于起出连接杆件的钉栓。

对于拖拉法中的连续纵梁上滑道,宜在钢梁接头处设置约 3m 长的短轨节,以便落梁时易于拆出。

落梁时每孔梁的一端应至少以两台千斤顶顶梁,交替地降低两侧及中间的枕木垛。最好每端用 4 台千斤顶交互顶落,以减少施工中的换顶时间。

图 4-4-37 表示四孔连续拖拉的简支梁的落梁步骤。一个桥墩上的两孔钢梁端部要同时落低,中间各墩的枕木垛在纵向可搭成整体的,支座可以预先安好在枕木垛内,以缩短安装时间。

七、拖拉钢梁的计算

桥跨结构的拖拉计算主要包括下列内容:

(1)**选择在各个拖拉阶段和各个部位每** 1m **长滑道上所需要的滚轴的数量**。

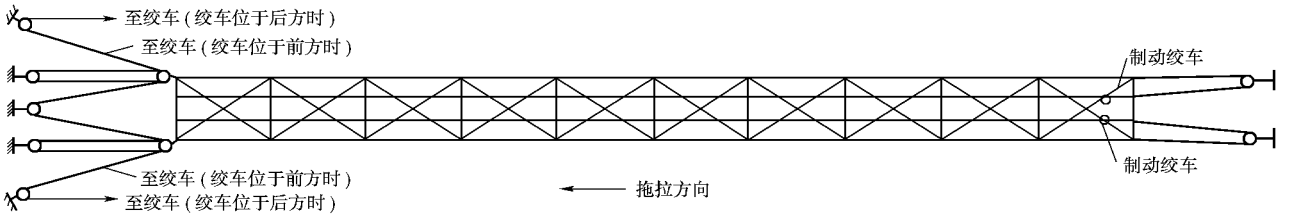


图 4-4-35　牵引绞车和制动绞车布置

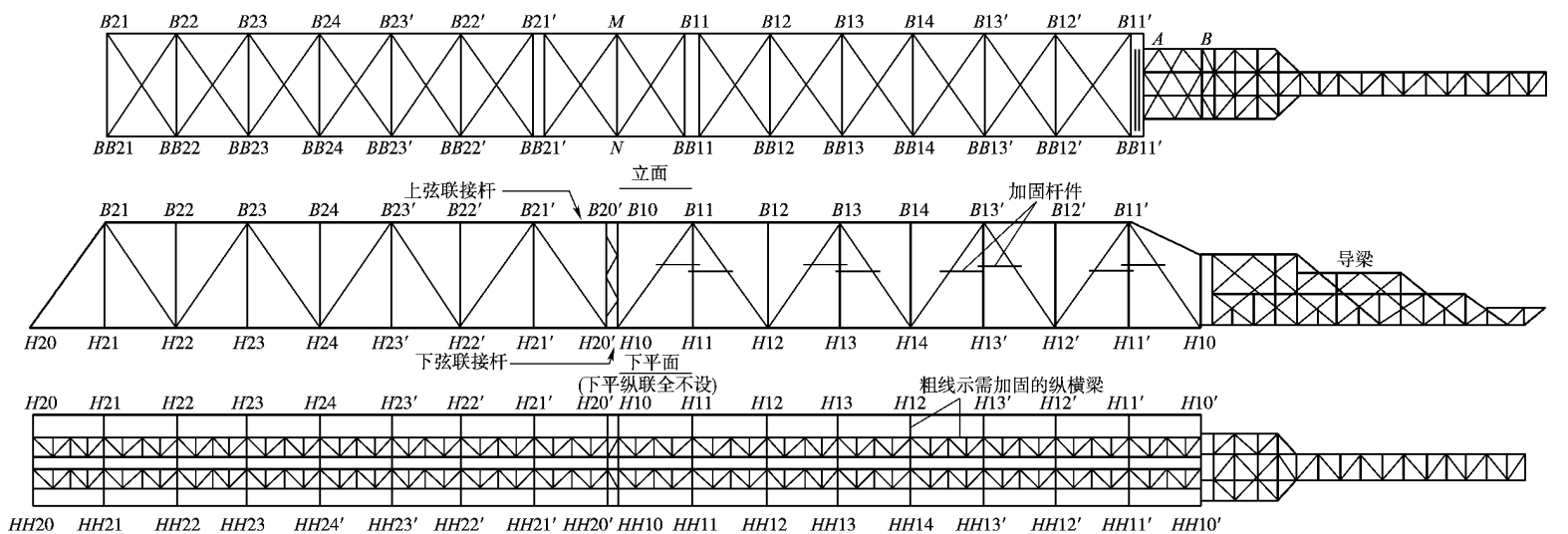


图 4-4-36　多孔钢桁梁拖拉施工布置图

(2)设计滑道、滑道的中间墩架、栈桥，以及永久性桥墩侧的临时结构的计算。

(3)被拖拉的桥跨结构的计算；桥墩结构在拖拉过程中，始终要注意纵向及横向的抗倾覆稳定安全系数不小于1.3；桥跨结构在拖拉过程中强度计算，要保证桥跨各杆件、桥面系、联结系有足够的强度而不超过安装时的容许应力。拖拉过程中要进行挠度的计算，以保证桥跨结构的变形在允许范围内而且能准确地安装在桥墩台上且符合设计高程的要求。

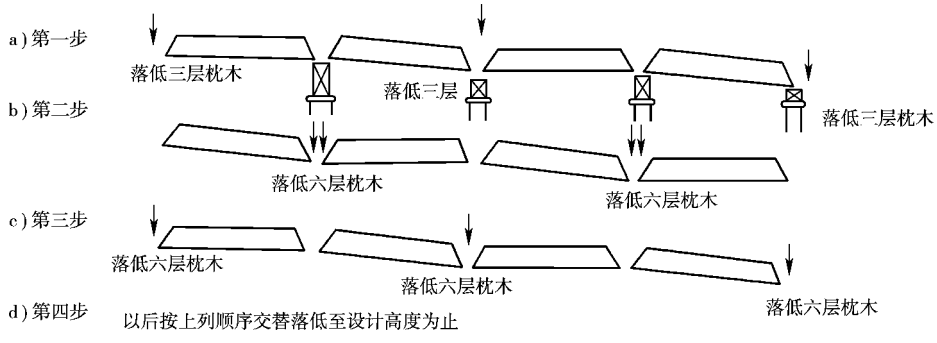


图4-4-37　落梁步骤示意图

(4)拖拉中牵引、制动及锚固设备的计算。

①牵引力和滚轴数目的计算。

在水平的滚轴滑道上滚移钢梁所需要的牵引力计算如下：

如图4-4-38所示，每一滑道中的滚轴其理论阻力为t，则：

$$t \cdot 2R = P(f+f)$$

$$t = \frac{Pf}{R} \tag{4-4-6}$$

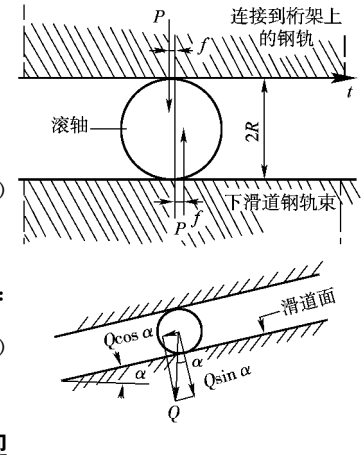


图4-4-38　牵引力和滚轴数目计算图示

式中：f——滚动摩擦系数，其值为0.05～0.1cm。

全部滚轴的实际阻力，亦即滚移钢梁所需绞车的牵引力为：

$$T = k\sum t = k\frac{f}{R}\sum P = k\frac{Qf}{R} \tag{4-4-7}$$

式中：Q——滚移时钢梁的全部计算重力(包括滑道重力)；

k——由于轨面和滚轴局部不平、滚轴斜置、滑道下陷、迎面风力等的阻力增加系数，一般取2.5～5。

一般在拖拉过程中，滑道设置均有一定的坡度，若滑道的下坡倾角为0，则：

$$T = k\frac{Qf\cos\alpha}{R} - Q\sin\alpha \tag{4-4-8}$$

当α为很小的角度时，$\cos\alpha=1$，$\sin\alpha=\tan\alpha$，故在滚轴上拖拉钢梁时，其计算牵引力为：

$$T = k\sum P\frac{f}{R} \pm Q\tan\alpha = \frac{kQf}{R} \pm \frac{Q}{n}\text{(上坡取+，下坡取−)} \tag{4-4-9}$$

式中：R——滚轴半径；

$\frac{1}{n}$——滑道的斜度，即$\tan\alpha$。

根据钢梁的重力(包括滑道重，以下同)，以及滚轴与钢轨每一接触处的容许压力，并假定上滑道钢轨束中钢轨的数目，即可求得每m长滑道上应有的滚轴数目，其值为：

$$m=\frac{K_1 P}{S \cdot N} \tag{4-4-10}$$

式中：P——每米长滑道上钢梁质量(t/m)；

N——上滑道中钢轨数目，一般为 2～5 根；

S——钢轨与滚轴每一接触处的容许压力，其值参考表 4-4-4；

K_1——压力分布不均匀系数，取 $K_1=1.25$。

容 许 压 力　　表 4-4-4

滚轴直径 d(mm)	接触处容许压力 S(10kN)	滚轴直径 d(mm)	接触处容许压力 S(10kN)
80	2～2.5	120	4.0
100	3～3.5	140	4.5～5.0

对于大跨度钢梁有时需要在装有轴承的轨行小车上进行拖拉。小车上每一车轮的理论移动阻力(图 4-4-39)为：

$$t \cdot R=Pf+\mu Pr$$

$$t=\frac{P}{R}(f+\mu r)$$

式中：f——滚动摩擦系数；

μ——滚珠与轴承间的滑动摩擦系数取 0.05～0.1。

所以，当坡度为$\frac{1}{n}$时，在有轴承的轨行小车上牵引钢梁的实际总阻力为：

$$T=K\frac{Q}{R}(f+\mu r)\pm\frac{Q}{n} \tag{4-4-11}$$

根据牵引力的大小可选择和布置牵引绞车的类型，以及选用滑轮组及钢丝绳等。为了拖拉钢梁的安全，均需设置制动绞车，制动绞车的牵引力为：

$$T_{制}=W-T_{小} \tag{4-4-12}$$

$$T_{小}=Q\left(0.01-\frac{1}{n}\right) \tag{4-4-13}$$

式中：W——沿拖拉方向作用在桥跨结构上的计算风力，纵向风力则等于横向风力的 40%，横向风力根据实际情况进行计算。

0.01 Q——系考虑拖拉钢梁溜放时的滚动摩阻力。

②临时墩架和支承反力的计算。

用于在纵向拖拉时支承钢梁的临时墩架的数目、尺寸以及相互的位置，是根据在拖拉过程中要始终保持钢梁抗倾覆稳定系数 $K\geqslant1.3$ 的条件，以及钢梁杆件本身的设计强度所决定的。

对于支承桁梁的中间墩架，其顺桥方向的宽度应不小于钢梁节长的 1.25 倍，而墩架间的距离以不大于跨长的 1/3 为宜。

中间墩架要受很大的压力，因此最好用常备式的拆装式杆件或尚未拼装的钢梁杆件拼成，并需按拖拉中的受力状况进行设计。

在组成墩架的各排架(或立柱)间应设置有足够的联结系(必要时设置斜撑)，以承受纵向(或横向)牵引钢梁时各墩架所分担的牵引力。特别是当墩架的顺桥宽度小于该墩架高度的 1/2 时，尤需进行此项验算。

决定中间墩架的高度除须注意使其稍低于永久性墩台支承垫面的高程，以便于其上用枕木垛垫高以支承滑道，降落钢梁。

决定中间墩架的高度除需根据设计的要求预留建筑拱度（以保证梁的拱度曲线）外，尚需考虑墩架本身在支承反力作用下所产生的弹性变形，以及拼组墩架时各种拼接和连接所产生的非弹性变形值。

在计算滑道的支承反力时，假定桥跨结构是绝对刚性的，因此纵向拖拉时是采用偏心受压法来计算滑道上和支承上的反力的。

图 4-4-40 表示在路基、引桥或满布式脚手架上拖拉钢梁时反力计算的图式。

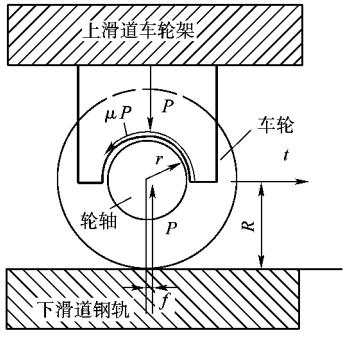


图 4-4-39 小车理论移动阻力

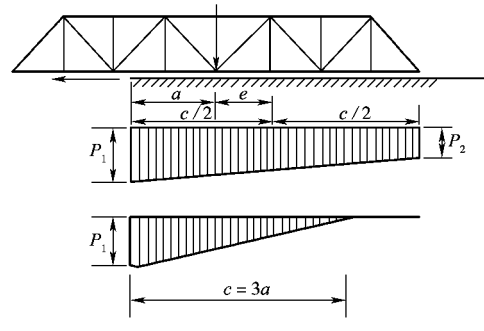


图 4-4-40 在路基或满步脚手架上钢梁拖拉反力计算图

当 $c<3a$ 时

$$P_1=\frac{Q}{c}+\frac{Qe}{\frac{c^2}{6}}=\frac{Q}{c}\left(1+\frac{6e}{c}\right)$$

$$P_2=\frac{Q}{c}\left(1-\frac{6e}{c}\right) \tag{4-4-14}$$

当 $c\geqslant 3a$ 时，$P_2=0$

$$P_1=\frac{2Q}{3a} \tag{4-4-15}$$

图 4-4-41 表示的是当被拖拉的钢梁用连续上滑道部分支承在路堤上，部分支承于中间墩架时，其支承反力的计算图式。

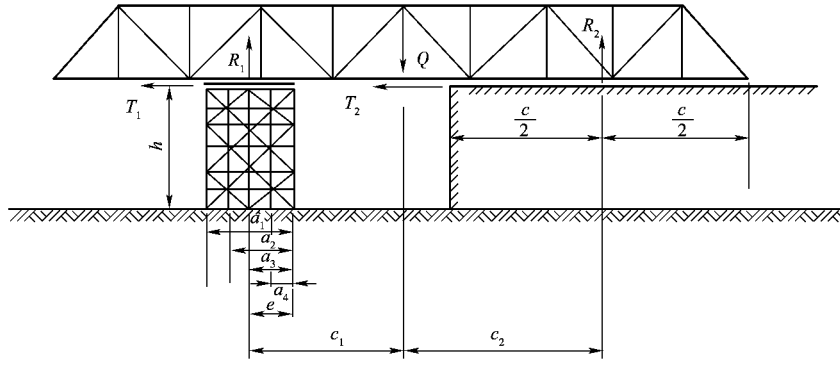


图 4-4-41 部分支撑在中间墩架上时钢梁拖拉计算反力图

如图所示，当组成墩架的各排架的主柱数目相同时，则墩架的重心距离最右边一个排架的距离为 e，则：

$$e=\frac{a_1+a_2+a_3+a_4}{5} \tag{4-4-16}$$

若右边二个排架的主柱数目各为 m，右边三个排架各为 n，则：

$$e=\frac{m(a_1+a_2)+n(a_3+a_4)}{2m+3n} \tag{4-4-17}$$

利用静力平衡方程式，不难求得：

$$R_1=\frac{Qc_2}{c_1+c_2},R_2=Q-R_1 \tag{4-4-18}$$

由上式可求得组成墩架的每一排架所受的荷载为：

$$S=\frac{R_1}{5}\text{或 }S=\frac{R_1m}{2m+3n}\text{和}\frac{R_1n}{2m+3n} \tag{4-4-19}$$

作用在墩架上的水平牵引力为：

$$T_1=\frac{R_1T}{R_1+R_2} \tag{4-4-20}$$

式中：T——作用于墩架和路堤的全部牵引力。

由于牵引力 T_1 的作用而使排架受到的附加荷载则为：

当主柱数目相同时：$\Delta S=\dfrac{T_1hb_x}{b_1^2+b_2^2+b_3^2+b_4^2+b_5^2}$

当主柱数目不同时：$\Delta S=\dfrac{T_1hb_xm}{m(b_1^2+b_2^2)+n(b_3^2+b_4^2+b_5^2)}$

或 $$\Delta S=\frac{T_1hb_xn}{m(b_1^2+b_2^2)+n(b_3^2+b_4^2+b_5^2)} \tag{4-4-21}$$

式中：b_x——需要计算的第 x 个排架至墩架重心的水平距离；

b_1、b_2——分别为 1 号排架，2 号排架至墩架重心间的水平距离。

此牵引力 T_1 系由排架之间的联结系承受，必要时，则需进行这方面的检算。

由以上求得的路堤上的反力 R_2，可得出路堤上滑道下面每沿 1m 的压力为：

$$P=\frac{R_2}{c} \tag{4-4-22}$$

以式(4-9)、式(4-10)、式(4-17)代入式(4-5)即可解得每 m 滑道下所需要设置的滚轴数目。

如果采用不连续的上滑道，且桥跨结构支承在两个或更多的墩架上时，如图 4-4-42 所示的图式，可用下列公式求出支承部分的重心位置和惯性矩。

即 $$e_0\ \frac{\sum c_nL_n}{\sum c_n}$$

$$J=\sum\left(c_na_n^2+\frac{c_n^3}{12}\right) \tag{4-4-23}$$

在支承墩架某处 x 的压力则为：

$$P_x=\frac{Q}{\sum c_n}\pm\frac{Qex}{J}$$

分布压力的最大数值是：

$$P_{max}=P_{n1}=\frac{Q}{\sum c_n}+\frac{Qex_{max}}{J}$$

$$=\frac{Q}{\sum c_n}+\frac{Qe\left(a_n+\frac{c_n}{2}\right)}{J} \tag{4-4-24}$$

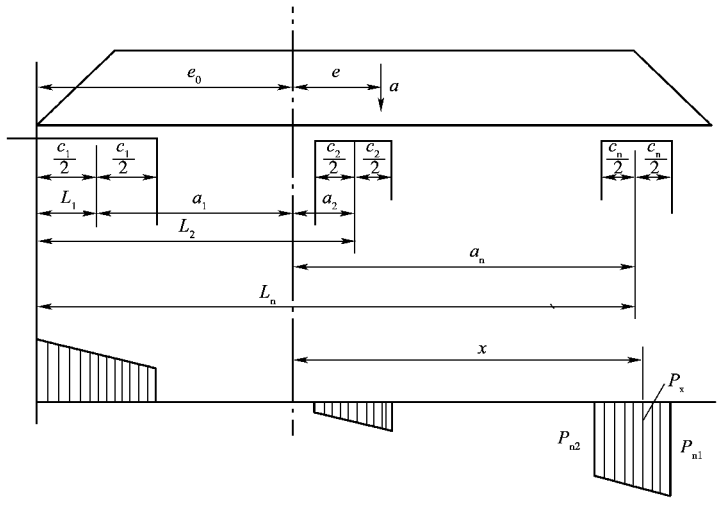


图 4-4-42　支承部分的重心位置和惯性矩计算图式

如果支承较小，可不考虑滑道上压力分布的不均匀，则：

$$P_n=\frac{P_{n1}+P_{n2}}{2} \tag{4-4-25}$$

横向拖拉移钢梁时，中间墩架的荷载计算如图 4-4-43 所示。钢梁支承于两边的端支点上，则横向沿滑道每米的压力为：

$$P_1=\frac{Q}{c_1-c_2}+\frac{W\cdot h\cdot\frac{c_2}{2}}{\frac{1}{12}\cdot 1\cdot(c_2^3-c_1^3)}$$

$$=\frac{Q}{c_2-c_1}+\frac{6Whc_2}{c_2^3-c_1^3} \tag{4-4-26}$$

式中：Q——拖拉中钢梁的计算重力；

F——横向风力，按规定进行计算；

h——风合力高出滑道滚轴中心的距离。

作用在各个支墩上的牵引力、横向风压力和由于横向风力所引起在下滑道上的压力 $\Delta P=\frac{Wh}{B}$，按桥跨结构重力作用在各支承墩上的垂直荷载来进行分配。例如，某墩承受荷载 $Q_n=\alpha Q$，则这个支承墩所受各力则为：

$$T_n=\alpha T,W_n=\alpha W,P_n=\alpha P$$

式中：α——荷载分配系数。

③对于桥跨本身强度的检算、挠度的计算，以及拖拉过程中稳定的计算，可据拖拉各阶段的实际情况，以及作用其上的荷载进行力学计算分析。

④对于大跨度钢梁在主桁节点下布置滑道拖拉架设时，由于荷重大，悬伸长度长，所引起弹性变形的影响，总是使节点产生向前偏转。致使支点反力在接触长度上分布不均匀，造成合力作用点对节点中心的偏心而引起了节点各杆的次应力。如图 4-4-44 所示，可近似地采用下列公式进行计算：

$$M_i=M\frac{k_i}{\sum\limits_{i=1}^{n}k_i} \tag{4-4-27}$$

式中：M_i——第 i 号杆件所分担的弯矩；

M——由于合力 R 偏心所产生的节点弯矩；

k_i——第 i 号杆件的截面惯性矩与长度之比，$k_i=\dfrac{I_i}{l_i}$。

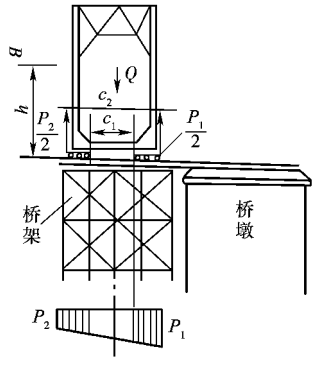


图 4-4-43　中间墩架的荷载计算图式

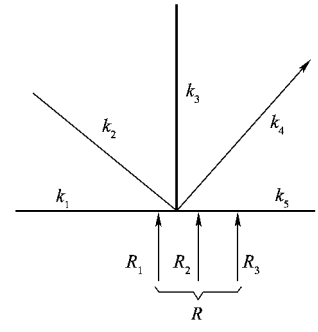


图 4-4-44　节点次应力计算图式

参 考 文 献

[1] 雷俊卿. 桥梁悬臂施工与设计. 北京：人民交通出版社，2000.

[2] 交通部第一公路工程局. 桥涵(下册). 北京：人民交通出版社，2000.

[3] 中国桥梁. 上海：同济大学出版社、建筑与城市出版社有限公司，1993.

[4] 西南交通大学. 铁路钢桥 . 北京：人民铁道出版社，1978.

[5] 铁路桥梁钢结构设计规范. 北京：中国铁道出版社，2000.

[6] 中国公路学会桥梁与结构工程学会. 中国公路学会桥梁与结构工程学会 2002 年全国桥梁学术会议论文集. 北京：人民交通出版社，2002.

[7] 中国公路学会桥梁与结构工程学会. 中国公路学会桥梁与结构工程学会 2003 年全国桥梁学术会议论文集. 北京：人民交通出版社，2003.

[8] 中国公路学会桥梁与结构工程学会. 中国公路学会桥梁与结构工程学会 2004 年全国桥梁学术会议论文集. 北京：人民交通出版社，2004.

[9] 中国公路学会桥梁与结构工程学会. 中国公路学会桥梁与结构工程学会 2005 年全国桥梁学术会议论文集. 北京：人民交通出版社，2005.

[10] 茅以升科技教育基金会桥梁委员会. 2005 年学术会议论文集. 重庆：重庆大学出版社，2005.